



Nuno Tiago Pires dos Santos Pinto

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDADURA POR RESISTÊNCIA NA QUALIDADE DA SOLDADURA DE REDE ELECTROSSOLDADA EM AÇO A500 NRSD

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Presidente: José Fernando de Almeida Dias, Professor Doutor, FCT-UNL
Arguente: Francisco Manuel Braz Fernandes, Professor Doutor, FCT-UNL
Orientador: Jorge Joaquim Pamies Teixeira, Professor Doutor, FCT-UNL
Co-orientadora: Rosa Maria Mendes Miranda, Professora Doutora, FCT-UNL



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Novembro 2011

Nuno Tiago Pires dos Santos Pinto
Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

**INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDADURA POR
RESISTÊNCIA NA QUALIDADE DA SOLDADURA DE
REDE ELECTROSSOLDADA EM AÇO A500 NRSD**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade
Nova de Lisboa para obtenção do Grau
de Mestre em Engenharia Mecânica

Novembro 2011

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLDADURA POR RESISTÊNCIA NA QUALIDADE DA SOLDADURA DE REDE ELECTROSSOLDADA EM AÇO A500 NRSD

Copyright @ Nuno Tiago Pires dos Santos Pinto, FCT /UNL, UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Uma palavra de apreço ao meu orientador Professor Doutor Pamies Teixeira e à minha co-orientadora Professora Doutora Rosa Miranda, pela ajuda que sempre me dedicaram no decorrer deste trabalho.

Ao Eng.º Pedro Rodrigues da Codimetal, pela constante disponibilidade e pela preciosa ajuda que me deu, uma especial palavra de apreço.

Agradeço ao Professor Doutor Nuno Leal e ao Professor Doutor João Pedro Botelho pela disponibilidade e ajuda prestada.

À Eng.^a Teresa Pires, Eng.^a Ana Geirinhas e a todos os funcionários da Codimetal pela informação, disponibilidade e ajuda prestadas.

Aos meus colegas e amigos que ao longo de todos estes anos me apoiaram, tornando esta experiência algo mais agradável. Ao Tiago, João, Francisco, Gonçalo, Valter e Ricardo, uma especial palavra de apreço pelo companheirismo demonstrado.

À minha família por todo o apoio prestado e compreensão demonstrada, em especial à minha querida irmã Cátia.

Rita, a ti meu amor, muito Obrigado.

A vocês meus pais, o mais importante obrigado, pelo apoio e amizade que sempre me transmitiram.

Desejo agradecer às seguintes instituições e empresas:

À Codimetal Industries, S.A.

Ao CENIMAT – Centro de Investigação em Materiais da Faculdade de Ciência e Tecnologia (FCT) da Universidade Nova de Lisboa (UNL).

Ao Centro de Investigação em Ciência e Engenharia Geológica da Faculdade de Ciência e Tecnologia (FCT) da Universidade Nova de Lisboa (UNL).

RESUMO

A soldadura por resistência por pontos é um processo muito usado na construção de redes electrossoldadas para construção civil. Contudo, as indústrias deparam-se com dificuldades em controlar o processo dada a elevada produtividade exigida neste tipo de construções. Este estudo visa estabelecer critérios que permitam aferir a importância da corrente, tempo e pressão no processo de soldadura por resistência por pontos, aplicado ao fabrico de redes electrossoldadas com varões de A500NRSD, através das alterações microestruturais no aço.

Caracterizou-se o material base, através de ensaios químicos, mecânicos e metalográficos. Foram realizados ensaios de soldadura em varões de diâmetros de 6 e 8 mm segundo um planeamento composto central circunscrito. Este tipo de planeamento permite analisar a influência de cada variável de processo e suas interações numa função resposta seleccionada previamente, neste caso foi a força de corte. Observou-se que o parâmetro operativo mais influente depende do diâmetro. Isto é, para o diâmetro de 6 mm o parâmetro mais influente identificado foi a corrente, enquanto para o diâmetro de 8 mm foi o tempo o parâmetro mais relevante.

Estudou-se o comportamento estrutural das amostras, fazendo variar o parâmetro mais influente, verificando-se o crescimento da zona de fusão com o aumento do valor da variável de processo. Para compreender a variabilidade do processo, dada pelos valores registados nos ensaios de caracterização mecânica dos varões soldados, analisaram-se para cada diâmetro, as duas amostras que apresentaram maior diferença de força de corte, observando-se uma segunda ZTA no contacto com o eléctrodo, dos provetes que exibiam a força de corte mais elevada.

Conclui-se que a variação dos resultados da caracterização mecânica dos pontos pode ser devida à presença de elementos de liga não constantes das normas e a heterogeneidades químicas e estruturais dos varões.

ABSTRACT

Resistance spot welding is used to manufacture metallic networks for construction. However, industries are facing difficulties to control the process, due to the high productivity required. This study aims to establish criteria to assess the importance of current, time and pressure, in manufacturing these networks in A500NRSD based on a microstructural changes in the joint.

For this, a chemical, mechanical and metallographic characterization of the material was performed. Welds were conducted with resistance spot and characterized according to the shear strength. Rods with 6 and 8 mm diameter were welded according to a Central Composite Design. This plan of experiments design allows the analysis of the importance of each variable as well as its interactions generating a response function, which was the shear strength. It was observed that the most important parameter of the process depended on the rod diameter. For the diameters analysis, it was found that the governing parameter was the current for 6 mm diameter and the time for 8 mm diameter rods.

The structural morphology of the fusion zone was studied, while varying the most important parameter, observing that it increased with the process variable value. To understand the variability of this process the two samples that presented the most discrepant values, for each rod diameter, were analyzed. A second heat affected zone in the contact area between the rod and the electrode was observed.

From this study, it was concluded that the variation of the mechanical characteristics of the welds may be due to the presence of alloying elements not expected in this material as a high content in sulphur that affected the weldability and structural heterogeneities.

PALAVRAS-CHAVE

Soldadura por resistência por pontos.

Varões electrossoldados.

Rede electrossoldada.

Microestruturas de aços.

Função resposta em *Central Composite Design*.

Força de corte de soldadura.

KEY-WORDS

Resistance spot welding.

Electro welded rods.

Electro welded networks.

Steel microstructures.

Response function on Central Composite Design.

Weld shear strength.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
PALAVRAS-CHAVE.....	vii
KEY-WORDS	vii
ÍNDICE	ix
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	xvii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objectivo	1
1.3 Estrutura da tese	2
2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE.....	3
2.1 Estruturas de aço para betão armado	3
2.1.1 Redes electrossoldadas para armaduras de betão armado	3
2.1.1.1 Aços.....	4
2.2 Soldadura por resistência por pontos.....	5
2.2.1 Principais parâmetros da soldadura por resistência.....	7
2.2.1.1 Intensidade da corrente de soldadura	7
2.2.1.2 Tempo de soldadura	9
2.2.1.3 Resistência de contacto	10
2.2.1.3.1 Composição do material a soldar	11
2.2.1.3.2 Superfície de contacto	11
2.2.1.3.3 Eléctrodos.....	12
2.2.1.3.4 Força de aperto.....	13
2.2.2 Equipamento de soldadura por resistência por pontos	14
2.2.2.1 Soldadura por pontos múltiplos.....	15

2.2.3	Avaliação de um ponto electrossoldado	16
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	19
3.1	Material	19
3.1.1	Caracterização físico-química e mecânica do material	20
3.2	Equipamento experimental.....	21
3.2.1	Equipamento de caracterização química	21
3.2.2	Equipamento de controlo e aquisição.....	21
3.2.2.1	Equipamento de controlo.....	22
3.2.2.2	Equipamento de aquisição.....	22
3.2.3	Equipamento de soldadura	24
3.2.4	Equipamento de caracterização mecânica.....	26
3.2.5	Equipamento de caracterização estrutural	27
3.3	Planeamento	27
3.4	Métodos experimentais	31
3.4.1	Elaboração de provetes.....	31
3.4.1.1	Provetes para caracterização do material base	32
3.4.1.2	Provetes para ensaio de corte	32
3.4.1.3	Provetes para análise microscópica de varão soldado	33
3.4.2	Análise química.....	33
3.4.3	Processo de soldadura	33
3.4.4	Caracterização mecânica	33
3.4.5	Caracterização estrutural	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1	Caracterização do material base	35
4.2	Caracterização mecânica dos pontos de soldadura.....	39
4.2.1	Varão com diâmetro de 6 mm	39
4.2.2	Varão com diâmetro de 8 mm	44
4.3	Caracterização estrutural	48
5	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	59

5.1	Conclusões	59
5.2	Desenvolvimentos futuros	60
6	BIBLIOGRAFIA.....	61
ANEXOS.....		I
A1.	Resultados dos ensaios preliminares de caracterização mecânica de varões de 10 mm de diâmetro, soldados por SRP	III
A2.	Resultados dos ensaios de despistagem para varão de 6mm, ensaiados a 6 ciclos	IV
A3.	Resultados dos ensaios de despistagem para varão de 8mm, ensaiados a 8 ciclos	V
A4.	Preparação das amostras metalográficas	VI
A5.	Resultados da caracterização mecânica de varões de 6 mm de diâmetro, soldados por SRP	VII
A6.	Resultados da caracterização mecânica de varões de 8 mm de diâmetro, soldados por SRP	VIII

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Principais "pontos" de transformação dos aços [5].	4
Figura 2.2 - Variação da corrente com o tempo, evidenciando as zonas de maior entrega térmica, adaptado de [18].	8
Figura 2.3 – Expulsão de material [17].	8
Figura 2.4 - Esquema de tempos numa soldadura por resistência [16].	10
Figura 2.5 - Resistências de contacto e distribuições de temperaturas num ponto electrossoldado [15].	11
Figura 2.6 - Resultado da existência de óxidos à superfície.	12
Figura 2.7 - Tipos de ponta de eléctrodos [12].	13
Figura 2.8 - Caracterização da força de forjagem [16].	14
Figura 2.9 - Esquema do circuito eléctrico. Adaptado de [15].	15
Figura 2.10 - Equipamento de soldadura por resistência por pontos múltiplos [20].	15
Figura 2.11 - Esquema de uma máquina de soldadura por pontos múltiplos. Adaptado de [9].	16
Figura 2.12 - Início da expulsão [15].	16
Figura 3.1 - Fluxograma de processo de fabrico de varão adaptado de Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais [4].	19
Figura 3.2 - Programa de aquisição de dados e controlo de soldadura.	21
Figura 3.3 - OpenChoice Desktop.	22
Figura 3.4 - Sensor de força.	23
Figura 3.5 - Janela de captação do osciloscópio.	24
Figura 3.6 - Protótipo de SRP.	24
Figura 3.7 - BOS – 5000.	25
Figura 3.8 - Janela de programação rápida.	26
Figura 3.9 - Modulação da corrente.	26
Figura 3.10 - CCC para duas variáveis (2D).	27
Figura 3.11 - Montagem do provete a soldar.	32
Figura 3.12 - Representação dos pontos de aplicação da força de corte, num provete electrossoldado, num ensaio de corte à soldadura.	34
Figura 4.1 – Fotomicrografia corte longitudinal de varão não soldado, antes do ataque químico, em que se vê pequenas inclusões no material, observado no microscópio óptico.	36
Figura 4.2 – Fotomicrografia corte transversal de varão não soldado, antes do ataque químico, em que se vê pequenas inclusões no material, observado no microscópio óptico.	36
Figura 4.3 – Fotomicrografia de um corte longitudinal de varão não soldado, depois do ataque químico, observado no microscópio óptico.	37

Figura 4.4 – Fotomicrografia de um corte transversal de varão não soldado, depois do ataque químico, observado no microscópio óptico.....	37
Figura 4.5 – Fotomacrografia de material base, varão de 6 mm diâmetro, observado no microscópio óptico.	37
Figura 4.6 – Fotomacrografia de material base, varão de 8mm diâmetro, observado no microscópio óptico.	37
Figura 4.7 – Fotomicrografia da periferia do varão, observado no microscópio óptico.	38
Figura 4.8 - Distribuição de durezas médias, a partir da periferia de varões não soldados.....	38
Figura 4.9 - Função resposta da força de corte (tempo eixo XX' e corrente no YY') para os níveis -1,618; 0; 1,618, da pressão (de realçar que a superfície que apresenta maior valor de força de corte corresponde ao nível -1,618, a que possui menor valor simboliza o nível 1,618 e a do meio o nível 0; varão de 6 mm).....	41
Figura 4.10 - Função resposta da força de corte (tempo eixo XX' e corrente no YY') para os níveis -1,618; 0; 1,618, da pressão (de realçar que a superfície que apresenta maior valor de força de corte corresponde ao nível -1,618, a que possui menor valor simboliza o nível 1,618 e a do meio o nível 0; varão de 6 mm).....	41
Figura 4.11 - Representação da função resposta da força de corte, para varões com 6mm de diâmetro, com os valores de pressão e tempo fixos nos pontos centrais do planeamento.	44
Figura 4.12 - Função resposta da força de corte (tempo eixo XX' e corrente no YY') para os níveis -1,618; 0; 1,618, da pressão (de realçar que a superfície que apresenta maior valor de força de corte corresponde ao nível -1,618 e a que possui menor valor simboliza o nível 1,618; varão de 8 mm).	46
Figura 4.13 - Representação da função resposta da força de corte, para varões com 8mm de diâmetro, com os valores de pressão e corrente fixos nos pontos centrais do planeamento.	48
Figura 4.14 – Fotomacrografia de um provete soldado, observado no microscópio óptico:	49
Figura 4.15 - Fotomicrografia da zona de fusão de um provete de varão soldado, observada em microscopia óptica.	49
Figura 4.16 – Fotomicrografia da zona de fusão de um provete de varão soldado observada em SEM.	50
Figura 4.17 – Fotomicrografia da transição da ZTA para o material base de um provete de varão soldado, observada em microscopia óptica.	50
Figura 4.18 - Fotomicrografia da ZTA de um varão soldado, observada em SEM.	51
Figura 4.19 - Fotomicrografia do material base de um provete de varão soldado, observada em SEM.	51
Figura 4.20 – Fotomacrografia do método de medição da zona de fusão de um varão soldado, observado em microscopia óptica.	52

Figura 4.21 - Distribuição de durezas médias, a partir da periferia dos varões utilizados para o estudo do crescimento das ZTA's, nos varões de 6 mm.	53
Figura 4.22 - Distribuição de durezas médias, a partir da periferia dos varões utilizados para o estudo do crescimento das ZTA's, nos varões de 8 mm.	54
Figura 4.23 - Distribuição de durezas médias, a partir da periferia dos varões utilizados para análise da maior discrepância de forças medidas, nos varões de 6 mm.	55
Figura 4.24 - Distribuição de durezas médias, a partir da periferia dos varões utilizados para análise da maior discrepância de forças medidas, nos varões de 8 mm.	56
Figura 4.25 - Comparação das zonas de contacto varão/varão (imagens de cima) e varão/eléctrodo (imagens de baixo), aparecimento de uma segunda ZTA no provete com maior força ao corte; no diâmetro de 6 mm, em microscopia óptica.....	57
Figura 4.26 - Comparação das zonas de contacto varão/varão (imagens de cima) e varão/eléctrodo (imagens de baixo), aparecimento de uma segunda ZTA no provete com maior força ao corte; no diâmetro de 8 mm, em microscopia óptica.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação dos processos de soldadura por resistência [9].	6
Tabela 2.2 – Comparação de algumas máquinas de fornecimento de corrente [18].	9
Tabela 2.3 – Resumo dos principais tipos de eléctrodos: propriedades e aplicações [12].	13
Tabela 3.1 - Valores nominais e tolerâncias [23].	20
Tabela 3.2 - Composição química dos varões A500 NR SD [23].	20
Tabela 3.3 - Características mecânicas [23].	21
Tabela 3.4 - Planeamento 1, CCC de quatro variáveis a cinco níveis.	29
Tabela 3.5 - Planeamento 2, Taguchi <i>design</i> 3^{k-p} de quatro variáveis a três níveis.	29
Tabela 3.6 - Sequência de ensaios de acordo com o planeamento definido.	30
Tabela 3.7 - Planeamento final, CCC de três variáveis a cinco níveis.	31
Tabela 4.1 - Análise química, varão de 6 mm.	35
Tabela 4.2 - Análise química, varão de 8 mm.	35
Tabela 4.3 - Média dos ensaios mecânicos dos varões de 6 mm.	36
Tabela 4.4 - Média dos ensaios mecânicos dos varões de 8 mm.	36
Tabela 4.5 - Características mecânicas de aprovação do ponto electrossoldado [21].	39
Tabela 4.6 - Tabela ANOVA referente aos factores influentes na força de corte de soldadura para o varão de 6mm (<i>STATISTICA</i>).	39
Tabela 4.7 - Tabela de efeitos estimados referente aos factores mais influentes na força de corte (varão de 6 mm)	40
Tabela 4.8 - Resultados do varão de 6mm organizados por importância de parâmetros.	42
Tabela 4.9 - Tabela ANOVA referente aos factores influente na força de corte de soldadura para varão de 8mm (<i>STATISTICA</i>).	45
Tabela 4.10 - Tabela de efeitos estimados referente aos factores mais influentes na força de corte de soldadura para varão de 8mm (<i>STATISTICA</i>).	45
Tabela 4.11 - Resultados do varão de 8mm organizados por importância de parâmetros.	46
Tabela 4.12 - Análise IA varão de 6 mm.	52
Tabela 4.13 - Análise IB varão de 8 mm.	52
Tabela 4.14 - Dimensões das zonas soldadas, análise IA, varão de 6 mm.	53
Tabela 4.15 - Dimensões das zonas soldadas, análise IB, varão de 8 mm.	53
Tabela 4.16 - Análise IIA varão de 6 mm.	54
Tabela 4.17 - Análise IIB varão de 8 mm.	55
Tabela 4.18 - Dimensões das zonas soldadas, análise IIA, varão de 6 mm.	55
Tabela 4.19 - Dimensões das zonas soldadas, análise IIB, varão de 8 mm.	55

LISTA DE ACRÓNIMOS

Agt	Extensão total na força máxima
ASTM	American society for testing and materials
B _f	Temperatura de fim de transformação de bainite (Bainite finish)
B _s	Temperatura de início de transformação de bainite (Bainite start)
CA	Corrente alterna
CC	Corrente contínua
CCC	Composto central circunscrito (Central composite design)
ER	Varões com superfícies sem nervuras
F _a	Frequência de amostragem
F _f	Força de forjagem
Ht	Corrente transmitida pelo sistema
I	Corrente
IIW	International Institute of Welding
M _f	Temperatura de fim de transformação de martensite (Martensite finish)
M _s	Temperatura de início de transformação de martensite (Martensite start)
N _{aqui}	Número de aquisições
NI	National Instruments
NR	Varões com superfícies nervuradas
P	Pressão
Q	Calor
R _e	Tensão de cedência
R _{e4}	Tensão de cedência inferior
R _{eH}	Tensão de cedência superior
R _m	Tensão de rotura
RMS	Raiz quadrada da média da soma dos valores ao quadrado (Root mean square)
SD	Varões com ductilidade especial
SEM	Microscópio electrónico de varrimento (<i>Scanning electron microscope</i>)
SRP	Soldadura por resistência por pontos
t	Tempo

t_d	Tempo de <i>delay</i> (atraso)
t_f	Rampa de crescimento da força de forjagem
α	Ferrite alfa
γ	Austenite ou ferro gama
δ	Ferrite delta

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

O aço A500NRSD possui características metalúrgicas que dificultam a sua soldabilidade em processos de soldadura por resistência de varões para malha electrossoldada usada na construção civil. A percentagem de carbono equivalente do aço e o gradiente de temperaturas provocado pela soldadura induzem uma têmpera no material, reduzindo o seu desempenho em serviço.

Devido ao facto deste aço serem materiais baratos e portanto sem grande controlo no fabrico, algumas das características da soldadura por resistência, tal como a fiabilidade e reprodutibilidade, deixam de se verificar.

O estudo destas malhas electrossoldadas foi negligenciado durante muitos anos, devido à facilidade com que é possível obter redes com boas propriedades mecânicas, sem grandes conhecimentos teóricos do processo, sendo que praticamente todos os estudos existentes sobre soldadura por resistência por pontos disponíveis, referem-se à soldadura de chapas e não de varões.

Considerando a conjuntura actual em que os recursos são escassos e as empresas estão sujeitas a uma grande concorrência internacional, obriga a um aumento de sua produtividade e redução de custos de produção. Para isso contribui a redução do tempo de fabrico e redução do consumo de energia.

Este trabalho teve a colaboração da empresa Codimetal, empresa produtora e exportadora de malhas electrossoldadas para a construção civil, com uma produtividade que rondar os 3500 pontos de soldadura por minuto em cada máquina.

1.2 Objectivo

Este estudo teve por objectivo o desenvolvimento de um modelo que permita estabelecer aprioristicamente critérios de qualidade aplicáveis ao processo real, validando os resultados para soldadura multiponto, através do estudo da influência dos parâmetros de processo, nas alterações microestruturais do aço A500 NR SD e na força de corte da soldadura.

No decorrer deste estudo foram controlados os três principais parâmetros do processo: a intensidade da corrente (I); o tempo ou número de ciclos de um ponto de soldadura (t); e a força de contacto entre varões (F). Os valores destes parâmetros foram adquiridos experimentalmente, em tempo real, avaliando as suas variações para cada ponto de soldadura efectuado.

Os pontos foram analisados estrutural e mecanicamente, estabelecendo critérios empíricos entre os parâmetros de processo e a força de corte.

1.3 Estrutura da tese

Esta dissertação divide-se em cinco capítulos.

O primeiro enquadra o trabalho desenvolvido e seus objectivos.

No segundo fez-se um levantamento do estado da arte das ligações na soldadura por resistência por pontos (SRP) de malhas electrossoldadas, parâmetros e modos operatórios, contemplando ainda os materiais e suas características.

No terceiro capítulo descreveu-se o procedimento experimental adoptado incluindo os ensaios de caracterização de material base e de pontos soldados, o sistema de controlo e aquisição de dados do processo, bem como o protótipo utilizado nos ensaios de soldadura.

Descreveu-se, justificando, o planeamento experimental elaborado e explicaram-se os métodos experimentais e as metodologias utilizadas

No quarto capítulo apresentam-se os resultados, destacando-se a caracterização do material base e as propriedades mecânicas dos pontos electrossoldados. Nesta última foram descritos e discutidos os resultados para cada um dos dois diâmetros de varão através de duas análises distintas, uma focalizada nas alterações presentes no aço quando se fez variar o parâmetro mais influente do processo (a corrente para 6 mm e o tempo para 8 mm de diâmetro) e outra em que se procurou explicar a razão desta tecnologia, fiável e reproduzível (motivo que a projectou para a indústria automóvel), possuir um comportamento tão díspar, quando aplicada ao fabrico destas malhas.

Finalmente no quinto capítulo apresentam-se as conclusões deste estudo, confrontando-as com os objectivos iniciais atingidos e a relevância dos resultados para uma possível aplicação industrial.

2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

A SRP está bem implementada industrialmente, num campo diverso de indústrias envolvendo uma vasta gama de materiais. Uma vez que se trata de um processo simples, que não requer equipamento e controlo muito sofisticado.

A SRP que é o processo de união utilizado para a produção de redes electrossoldadas integradas em estruturas de betão armado, pelo que se torna necessário um conhecimento mais aprofundado dos parâmetros que afectam e controlam este processo, bem como o funcionamento dos diversos tipos de equipamento de SRP e os métodos de avaliação de um ponto electrossoldado.

De salientar que existe uma bibliografia muito vasta sobre o processo, particularmente quando aplicado a chapas, sendo mais escassa no que se refere à aplicação a varões. Relativamente a varão em aço para construção civil, não existem trabalhos de investigação recentes, pese embora a importância económica deste processo para a produção de malhas electrossoldadas, para betão armado e que foi o alvo deste trabalho.

2.1 Estruturas de aço para betão armado

Desde o século XVIII que os ferros fundidos são usados na construção, sendo substituídos no século XIX pelos ferros forjados e mais tarde pelo aço. Este continua a ser, ainda hoje, o mais utilizado, particularmente os aços não ligados com tensões de cedência mínimas da ordem dos 227,5 MPa, de acordo com a ASTM [1].

2.1.1 Redes electrossoldadas para armaduras de betão armado

Com a utilização generalizado do betão na primeira metade do século XX, um método comum de minimização de fendas no betão é a utilização de redes electrossoldadas incorporadas no betão (betão armado), aplicável na execução de paredes e lajes, entre outros [2].

As redes electrossoldadas podem ser fabricadas a partir de cinco tipos de aços distintos, mas cada rede pode apenas possuir um tipo de varão de entre os seguintes; A400 NR, A400 NR SD, A500 NR, A500 NR SD e A500 ER. Estas malhas podem ser dispostas sob uma forma plana, empilhadas umas sobre as outras, ou em bobine.

Todas as redes devem ser produzidas a partir de SRP, utilizando equipamento e local adequados. As resistências ao corte das ligações longitudinais e transversais são especificadas na norma *ISO 15630-2:2010 (E)* [3].

2.1.1.1 Aços

As ligas ferro-carbono que contêm quantidades de carbono variando normalmente entre 0,03% a 1,2%, com teores de manganês de 0,25-1,0% e pequenas quantidades de outros elementos, são os chamados aços ao carbono.

Na Figura 2.1 apresenta-se parte do diagrama de equilíbrio metaestável Fe-C relativo aos aços, evidenciando os domínios das principais fases e as suas transformações que ocorrem nestas ligas [4].

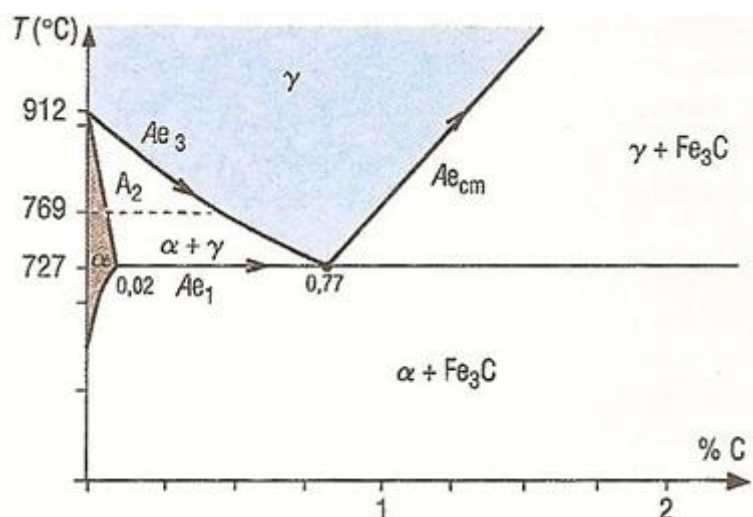


Figura 2.1 - Principais "pontos" de transformação dos aços [5].

Entre muitos tipos de classificações, os aços dividem-se em três subcategorias; (1) baixo teor em carbono (menos de 0.15%), (2) médio teor (0.15 – 0.59%) e (3) alto teor (maior que 0.6%).

A metalografia, que surgiu no final do século XVII, início do XVIII, visa descrever as características estruturais das ligas metálicas [6].

As ligas de ferro-carbono, em equilíbrio, apresentam as seguintes fases como se observa no diagrama de fase da Figura 2.1:

- Austenite - solução sólida intersticial de carbono e no ferro γ com estrutura CFC,

- Ferrite:
 - δ - solução sólida intersticial do carbono em ferro δ com estrutura CCC estável a altas temperaturas,
 - α - solução sólida intersticial do carbono no ferro α com estrutura CCC estável a baixas temperaturas,
- Cementite ou carboneto de ferro (Fe_3C) – com uma composição correspondente de 6,67 % em massa de carbono e
- Perlite - constituída por duas fases, ferrite α e cementite. O agregado é lamelar por se tratar de uma fase eutectóide formada em condições de arrefecimento lento, ou seja, de equilíbrio.

Quando arrefecido em condições de não equilíbrio podem formar-se:

- Bainite - uma estrutura de ferrite e cementite numa transformação com difusão, dividindo-se em dois tipos a superior e a inferior que diferem na gama de temperaturas em que cada uma se forma e na morfologia que apresenta: mais grosseira na bainite superior e mais fina na bainite inferior e
- Martensite - uma solução sólida sobressaturada de carbono em ferro. Esta surge quando a temperatura atinge o início de transformação martensítica (M_s – *martensite start*) e deixa de se formar a M_f (*martensite finish*) [5].

Contudo os aços não são ligas binária Fe-C puras, contêm na sua constituição elementos de liga adicionados intencionalmente para conferir determinadas propriedades (por exemplo resistência a altas temperaturas, resistência à corrosão, etc.) ou residuais, como é o caso do fósforo e do enxofre. Estes últimos são aqueles que, ou não se conseguem remover do aço, ou a sua remoção é excessivamente dispendiosa e constituem impurezas.

2.2 Soldadura por resistência por pontos

A soldadura é uma tecnologia que permite obter uma ligação permanente entre dois componentes. Pode ser efectuada por aplicação de calor, pressão ou ambos, com ou sem adição de material [7]. O Instituto Internacional da Soldadura (IIW) distingue os processos de soldadura: por fusão, a frio, brasagem e soldobrasagem e soldadura por resistência.

Com a descoberta da soldadura por resistência eléctrica em 1886 por Elihu Thomson (1853-1937) [8], abriu-se um leque de possibilidades de soldar os mais diversos materiais até à

data impossíveis. Este método através dos seus diversos tipos de execução veio dar um grande contributo no desenvolvimento industrial de então. Juntando a elevada velocidade de processamento e o facto de não necessitar de material de adição, este processo económico quando comparado com outros concorrentes.

Na Tabela 2.1 resumem-se as diversas variantes da soldadura por resistência de acordo com o tipo de junta.

Tabela 2.1 - Classificação dos processos de soldadura por resistência [9].

Tipo de Junta	Tipo de Soldadura	Processo Mecânico	Forma de Aquecimento
Junta Sobreposta	Por Pontos	Com um par de eléctrodos	Por Resistência (Efeito de Joule)
		Com um par de eléctrodos de pontas múltiplas	
		Por pontas duplas	
		Pontas múltiplas executadas por um equipamento	
	Contínua	Por roletes	
		Com dois roletes	
		Com um rolete e um suporte	
	Por bossas	Prensa de soldadura	
Junta topo a topo	Por resistência	Equipamento de soldadura topo a topo	Por resistência
			Por faíscamento
	Por faíscamento		Misto, por resistência e por faíscamento
Junta em T		Máquinas de soldadura por pontos	Por resistência
		Máquinas de soldadura topo a topo	Por faíscamento

Em 1898 aparece a primeira utilização da soldadura por pontos, sendo aplicada à produção de utensílios de cozinha [10]. Este tipo de soldadura por resistência é o mais comum, sendo mais expedito que a soldadura por fusão, para a junção de chapas de metal, automatizável e não necessitando de pessoal especializado, o que baixa o custo com a mão-de-obra [11].

Em 1915, é difundida para a indústria automóvel, o que veio trazer um maior desenvolvimento ao processo e a emergência de novas variantes. Durante a Segunda Grande Guerra a necessidade de produção de transportes bélicos levou à implementação em grande escala da soldadura por resistência [10].

A importância alcançada pela soldadura por resistência na indústria é explicada por diversas razões como sejam:

- O seu baixo custo durante a produção
- Inexistência de consumíveis

- Elevada fiabilidade
- Reprodutibilidade, facto que a torna facilmente.

A sua adaptação a qualquer situação, possibilita a conjugação de peças com diferentes composições químicas e formas particulares que seriam impossíveis de soldar através de outro processo, tendo como principais desvantagens o custo inicial dos equipamentos, a elevada especialização na manutenção, a impossibilidade de soldar grandes espessuras e, em certos materiais, é necessário uma preparação especial das superfícies das peças a soldar [10,12].

2.2.1 Principais parâmetros da soldadura por resistência

A soldadura por resistência baseia-se no *efeito de Joule*, equação (2.1) [13]. Este efeito físico foi caracterizado por James P. Joule (1818-1889) [14] e quantifica a quantidade de calor (Q) gerada pela passagem de corrente (I) numa superfície resistiva (R) ao longo de um dado tempo (t). A resistência é criada pelo contacto das superfícies a soldar, e é ainda nestas superfícies que se desenvolve o calor necessário para a obtenção da fusão local do material e consequente ligação [7].

$$Q = I^2 \times t \times R \quad (2.1)$$

O princípio é simples, contudo existem diversos parâmetros operatórios a controlar, como sejam a intensidade de corrente, o tempo e a força aplicada.

2.2.1.1 Intensidade da corrente de soldadura

A corrente é das três variáveis consideradas na *lei de Joule* a que tem maior peso uma vez que é expressa ao quadrado. A corrente necessária para efectuar a soldadura é inversamente proporcional à raiz quadrada do produto do tempo pela resistência. Assim quanto menor o tempo de soldadura maior terá de ser a corrente. Os dois factores que influenciam a variação da corrente num processo são as flutuações de corrente da rede e a variação de impedância no circuito eléctrico secundário [15].

A corrente de um processo de soldadura pode ser de dois tipos; contínua e alterna. A corrente contínua (CC) tem a vantagem de não ser significativamente afectada por materiais magnéticos no circuito secundário e pela geometria do circuito. As máquinas podem produzir corrente contínua por rectificação (máquinas de tipo rectificado), por pulsos de corrente alternando a sua polaridade (máquinas inversoras de corrente) ou por picos de corrente e por descarga de energia eléctrica armazenada (máquinas de descarga capacitiva) [15]. Na maioria dos casos são utilizadas máquinas de corrente alterna (CA), com a mesma frequência da rede, 50 Hz. A máquina contém um transformador de fase única, o qual fornece elevadas correntes a baixa

tensão [15]. A ideia subjacente ao uso da corrente alterna é que, na formação da soldadura, esta não depende apenas da quantidade calor fornecida, mas também do modo como se atinge o processo. Um perfil de corrente constante fornece, aproximadamente, uma quantidade de calor constante, assumindo que a resistência ao longo da soldadura não varia significativamente. No entanto, não existem estudos que mostrem que se obtém uma melhor soldadura com CC [16].

Um dos problemas mais conhecidos da soldadura por resistência é a expulsão de material. Esta é normalmente observada no estágio final do processo. Num processo com a corrente constante, o calor gerado em todas as fases, é constante. Enquanto com um perfil de corrente alterna existe um decréscimo gradual da corrente, pois o máximo de corrente fornecida é no pico, reduzindo a entrega térmica no final do processo Figura 2.2. Este pode ser um método que permite reduzir a probabilidade do aparecimento de expulsões (Figura 2.3) [17].

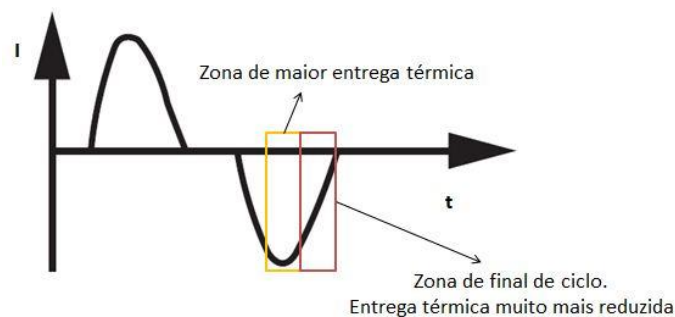


Figura 2.2 - Variação da corrente com o tempo, evidenciando as zonas de maior entrega térmica, adaptado de [18].

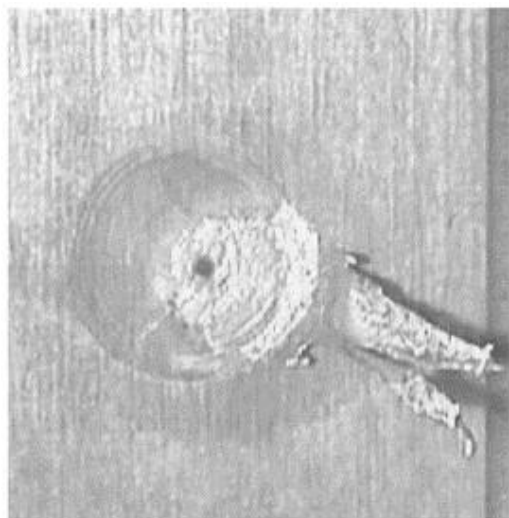
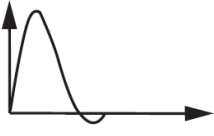
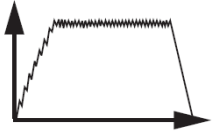

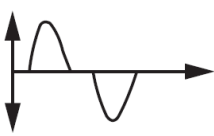


Figura 2.3 – Expulsão de material [17].

Na Tabela 2.2 resumem-se as vantagens, limitações e aplicações específicas dos diferentes modos de fornecimento de corrente, a considerar na selecção da fonte de soldadura.

Tabela 2.2 – Comparação de algumas máquinas de fornecimento de corrente [18].

Fornecimento de corrente	Forma da Onda	Tempo típico de ciclo	Tipo de ligação típica	Rácio de Repetição	Vantagens	Limitações
Máquinas do tipo descarga capacitiva		1-16 ms	Estado sólido	$\leq 2/s$	Robusto e de baixo custo. Adequado para materiais de elevada condutividade.	Circuito aberto. A descarga é auto-regulável
Máquinas de corrente pulsada		1000 ms	Estado sólido, fundida, refluxo	$\leq 10/s$	Excelente controlo e repetibilidade. Permite correntes elevadas e altos ciclos de trabalho	Alto custo
Máquinas do tipo rectificado		0.010-9.99 ms	Estado sólido	$\leq 1/s$	Adequado a materiais amorfos, placas finas ou varões. Excelente controlo e repetibilidade	Alto custo de manutenção. Número de ciclos de trabalho limitados
Máquinas de corrente alterna (CA)		> 8 ms	Fundida, refluxo	$\leq 5/s$	Rudimentar e de baixo custo	Pouco exacto para o controlo de ciclos de curta duração

2.2.1.2 Tempo de soldadura

O calor gerado num ponto de soldadura é proporcional ao tempo de soldadura, como se pode verificar pela equação (2.1). O calor é essencialmente perdido por condução para o material e para os eléctrodos e uma pequena quantidade é, ainda, perdida por radiação. Estas perdas aumentam com o tempo de soldadura, e portanto, quanto menor for o tempo de soldadura mais eficiente se torna o processo, existindo, no entanto, uma limitação física inerente, que obriga a uma exposição mínima para a ocorrência de soldadura [15].

Na Figura 2.4 apresenta-se um esquema exemplificativo do efeito do tempo num processo de SRP. O primeiro, designado por tempo de aperto, tem como objectivo permitir que o eléctrodo se desloque até à peça e que a força exercida estabilize; o tempo de soldadura é o tempo durante o qual existe passagem de corrente e ocorre a fusão do material; o tempo de suporte faz com que o material solidifique na posição correcta ainda sob efeito de aplicação de força; o tempo de retorno do eléctrodo em que este é removido e consequentemente a força exercida.

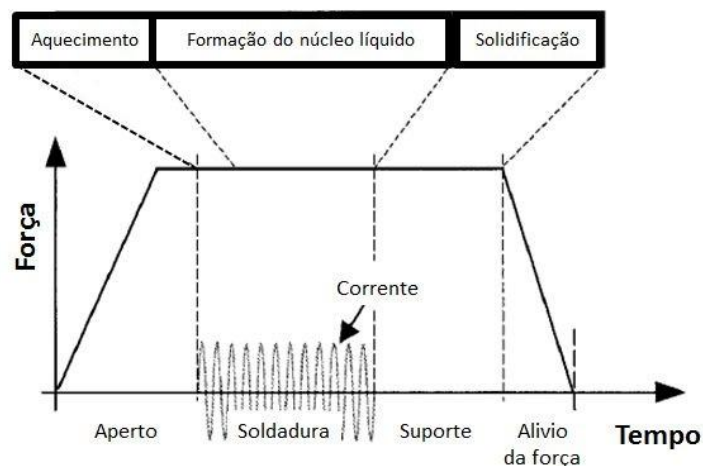


Figura 2.4 - Esquema de tempos numa soldadura por resistência [16].

2.2.1.3 Resistência de contacto

As superfícies dos metais são bastante rugosas quando analisadas microscópicamente, que impede que exista um contacto perfeito entre as diferentes superfícies [18], existindo por isso uma resistência intrínseca a esse contacto. Esta é especialmente importante nos primeiros instantes do processo (da ordem dos milissegundos).

Uma característica importante da resistência de contacto é o elevado gradiente térmico que ocorre quando se dá a geração do calor necessário para a soldadura. A distribuição de temperaturas num circuito secundário encontra-se ilustrada na Figura 2.5, em que se pode verificar o efeito de sete resistências de contacto montadas em série, agrupadas em quatro pares, que são:

1. ① e ⑦, resistência inerente à passagem de corrente pelo eléctrodo,
2. ② e ⑥, contacto entre os eléctrodos e o material,
3. ③ e ⑤, resistência do material a soldar à passagem de corrente,
4. ④, contacto entre as duas peças a soldar, sendo esta diversas ordens de grandeza maior que as demais e sendo devido a ela que se faz a soldadura.

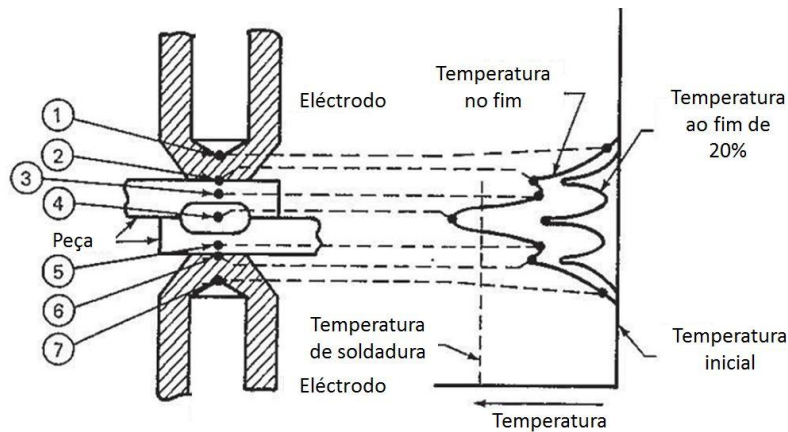


Figura 2.5 - Resistências de contacto e distribuições de temperaturas num ponto electrossoldado [15].

A resistência de contacto é ainda influenciada por quatro factores distintos: material a soldar; estado das superfícies; tipos de eléctrodos; força de aperto.

2.2.1.3.1 Composição do material a soldar

A composição do material determina o seu calor específico, a temperatura de fusão, o calor de fusão latente, a condutividade térmica e a resistividade eléctrica. Esta última influencia, directamente, a geração de calor no processo de soldadura por resistência. Em materiais como o cobre ou a prata, a geração de calor é quase nula, mesmo com uma elevada intensidade de corrente [15], uma vez que eles são bons condutores eléctricos.

2.2.1.3.2 Superfície de contacto

As condições das superfícies estão fortemente ligadas ao modo de elaboração das peças [10] e influenciam a geração de calor na soldadura, a qual diminui na presença de óxidos, sujidade, óleo e outras substâncias estranhas ao material, produzindo uma geração inconsistente de calor (Figura 2.6). Do lado direito, detecta-se um pico, de tensão, inicial maior que os restantes, na aquisição dos parâmetros da soldadura de varões nervurados cujas superfícies se encontravam oxidadas, ao passo que a aquisição do lado esquerdo, exactamente com os mesmos parâmetros da anterior, não evidencia este pico. A geração de calor pode ser mais uniforme quando se trabalha com superfícies limpas como é o caso do material do lado esquerdo [15]. A queda de tensão está directamente relacionada com a resistência da montagem, pela lei de *Ohm* [13], equação (2.2). Como a corrente fornecida ao sistema é conhecida, através da aquisição da queda de tensão calcula-se a resistência. Assim conclui-se que a diferença de potencial entre os eléctrodos aumenta linearmente com a resistência global do sistema.

$$V = R \times I \quad (2.2)$$

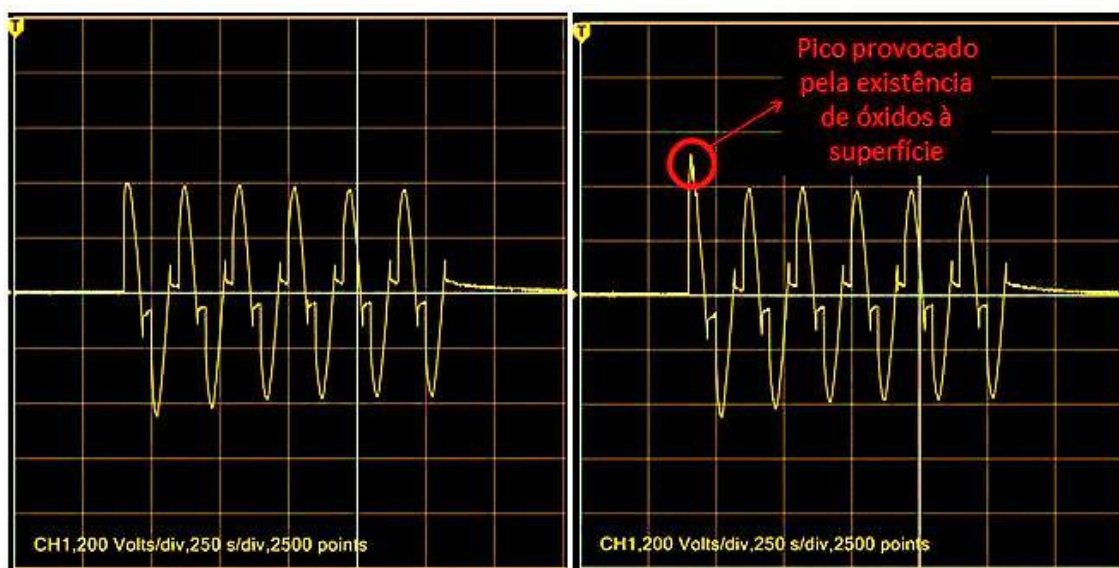


Figura 2.6 - Resultado da existência de óxidos à superfície.

2.2.1.3.3 Eléctrodos

Os eléctrodos têm um papel fundamental na geração de calor pois são eles que conduzem a corrente eléctrica. No caso da SRP, a área de contacto do eléctrodo define o tamanho da zona de soldadura [15].

Estes devem satisfazer alguns requisitos, pois estão sujeitos a altas correntes eléctricas e elevadas pressões. Os eléctrodos devem então possuir:

- Uma elevada condutividade eléctrica, a fim de reduzir as perdas,
- Elevada condutividade térmica, para facilitar a dissipação de calor,
- Alta resistência à deformação e
- Características que mantenham suas propriedades físicas inalteradas a elevadas temperaturas.

Contudo, não podem ficar colados ao material e o seu custo deve ser reduzido uma vez que são consumíveis, isto é, têm um tempo de vida finito [12].

Os eléctrodos podem ter uma grande variedade de composições, formas e geometrias, como se pode ver na Tabela 2.3 e na Figura 2.7. Estes devem ser escolhidos consoante a sua aplicação.

Tabela 2.3 – Resumo dos principais tipos de eléctrodos: propriedades e aplicações [12].

Eléctrodos	Propriedades	Aplicações
Cobre, 1% prata	Alta condutividade, dureza média	Ligas leves e aços revestidos
Cobre, 0,6% Cr ou 0,5% Cr e Be	Possui a melhor condutividade eléctrica com elevada dureza	Aço não oxidado ou pouco oxidado, latão e níquel. É usado nos braços das máquinas.
Cobre, 2,5% Co e 0,5 Be	Baixa condutividade mas elevada dureza	Para soldar metais muito duros com alta resistividade
Cobre e berílio	Baixa condutividade com melhor dureza que o anterior	Para garras de soldadura



Figura 2.7 - Tipos de ponta de eléctrodos [12].

Outro aspecto fundamental na utilização dos eléctrodos é o seu estado de conservação. Para que estes não influenciem a soldadura devem ser limpos regularmente, numa manutenção preventiva, ou substituindo-os, se necessário.

2.2.1.3.4 Força de aperto

A força aplicada através dos eléctrodos visa garantir o contacto entre estes e as peças a soldar. Durante as diversas fases descritas na Figura 2.4, verifica-se que inicialmente aumenta, de seguida estabiliza e finalmente decai [16].

Devido à rugosidade superficial dos componentes, a baixas pressões o contacto dá-se apenas nos “picos”, o que aumenta a resistência de contacto. Com o aumento da pressão dá-se um esmagamento desses “picos” implicando um aumento da área de contacto o que promove um decréscimo da resistência de contacto. Quando a temperatura do ambiente de trabalho se mantém constante, existe uma pressão limite, acima da qual a resistência de contacto entre as superfícies estabiliza [15].

No entanto, um sistema de força constante pode não ser a hipótese mais adequada para a obtenção de uma boa soldadura. Como já foi referido, uma força constante pode não ser suficiente para comprimir o núcleo, de modo a evitar defeitos como fissuras ou poros. Assim, surge a aplicação da força de forjagem, a qual pode ser representada por três parâmetros distintos (1) a magnitude da F_r , (2) o tempo de aplicação e (3) o tempo de aplicação da força F_r ,

Figura 2.8. A aplicação de uma força dinâmica deste tipo pode servir para obviar os problemas de uma força contínua descritos anteriormente [16,19].

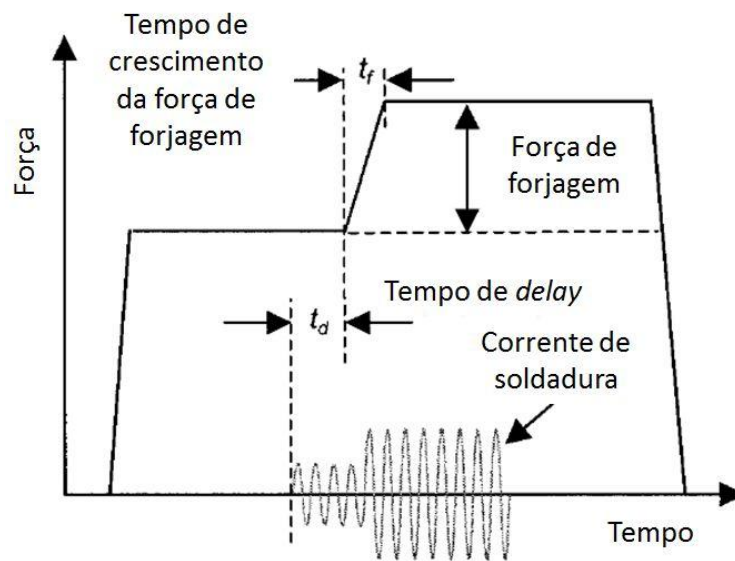


Figura 2.8 - Caracterização da força de forjagem [16].

2.2.2 Equipamento de soldadura por resistência por pontos

Num equipamento de SRP existem três tipos de constituintes básicos:

- Eléctrico,
- Mecânico,
- De controlo.

O sistema eléctrico contém todo o equipamento pelo qual passa a corrente que desencadeia o processo, isto é, a fonte alimentação, o transformador, os cabos eléctricos das ligações e os eléctrodos (Figura 2.9).

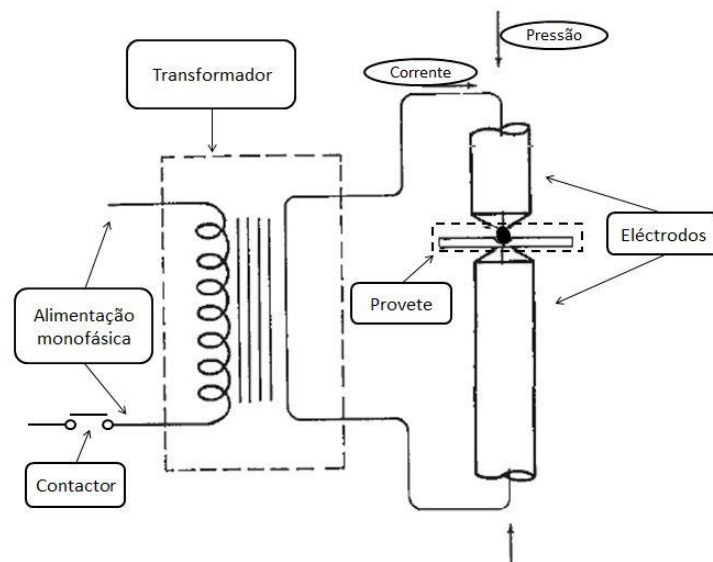


Figura 2.9 - Esquema do circuito eléctrico. Adaptado de [15].

O sistema mecânico da máquina é a estrutura que serve de suporte ao circuito eléctrico, que permite a fixação das peças e a aplicação da força de aperto. O dispositivo de aperto pode ser actuado manual ou automaticamente podendo a força ser transmitida por um motor eléctrico ou por sistemas pneumáticos ou hidráulicos.

Os componentes de controlo encontram-se, por norma, acondicionados separadamente (num armário de controlo) onde são inseridos os parâmetros da soldadura.

2.2.2.1 Soldadura por pontos múltiplos

Estes equipamentos permitem a produção de malhas electrossoldadas (Figura 2.10). O princípio de funcionamento é o mesmo do anterior, sendo por norma a pressão e a corrente transmitida, em paralelo, a todos os pontos a soldar (Figura 2.11).



Figura 2.10 - Equipamento de soldadura por resistência por pontos múltiplos [20].

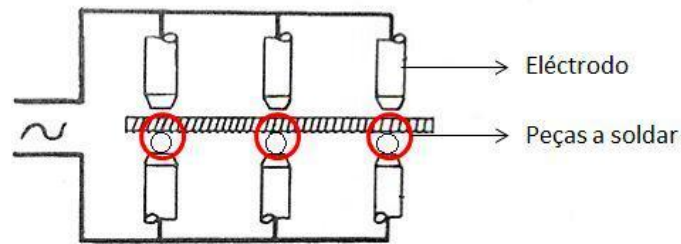


Figura 2.11 - Esquema de uma máquina de soldadura por pontos múltiplos. Adaptado de [9].

2.2.3 Avaliação de um ponto electrossoldado

O uso impróprio da SRP por aplicação de tempos de soldadura incorrectos, electrodos mal escolhidos ou deficiente contacto entre as peças a soldar, entre outros, pode dar origem ao aparecimento de defeitos. Embora alguns defeitos tenham apenas influência no aspecto da peça, outros poderão afectar a integridade estrutural do componente, como por exemplo expulsões (Figura 2.12) cavitações, fracturas na soldadura e piores propriedades mecânicas da peça soldada [15].

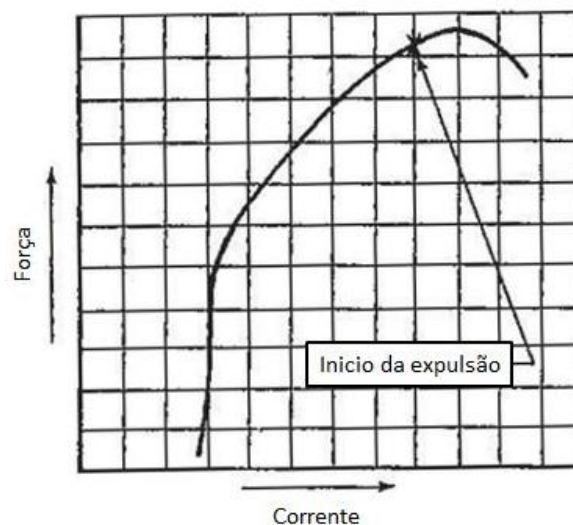


Figura 2.12 - Início da expulsão [15].

A avaliação da qualidade da soldadura é pois fundamental. Os parâmetros que definem a qualidade de uma soldadura não são fixos nem definidos por nenhuma entidade reguladora. Existem recomendações descritas pela *American Welding Society (AWS)*, mas em última instância a qualidade é determinada pelo produtor.

A qualidade de uma soldadura é definida por parâmetros quantificáveis, os quais provêm de dois tipos de análises: uma avaliação destrutiva (ensaios mecânicos às soldaduras) ou ensaios não destrutivos.

Os ensaios mecânicos podem ser de três tipos distintos de ensaios, segundo a norma *ISO 15630-2 Steel for the reinforcement and prestressing of concrete – Test methods – Part2: Welded fabric*

de 2010 [21]:

- Ensaios estáticos, como por exemplo ensaios de tracção e de arranque da soldadura,
- Ensaios dinâmicos, entre os quais ensaios de fadiga,
- Ensaios de torção, tais como o ensaio de dobragem e o de dobragem-desdobragem.

Os ensaios não destrutivos (END) podem ser executados através uma série de processos distintos, tais como ultra-sons, radiografia, partículas magnéticas (só aplicável a materiais ferro-magnéticos) e correntes induzidas.

Este tipo de análise tem vantagens e desvantagens em relação aos anteriores. A vantagem óbvia reside no facto de não ser necessário inutilizar as peças a testar. Como desvantagens temos as dificuldades que existem na integração destes processos numa linha de produção e a necessidade de mão-de-obra especializada para a realização destas análises [17].

No caso de malhas electrossoldadas não existem, por enquanto, técnicas de END aplicáveis, pelo que a qualidade de um ponto electrossoldado, neste momento, só é avaliada pela força, que cada ponto de soldadura suporta antes de ceder, por ensaios de fadiga e de dobragem, realizados segundo a norma *ISO 15630-2 Steel for the reinforcement and prestressing of concrete – Test methods – Part2: Welded fabric* de 2010 [21], um processo de amostragem estatística.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo descrevem-se o material, o equipamento, o planeamento e método experimentais utilizados neste estudo.

De referir que se utilizou o ensaio de corte para caracterizar o comportamento dos varões soldados por resistência, uma vez que este ensaio permite uma quantificação da resistência mecânica da soldadura ao contrário dos restantes indicados na norma *ISO 15630-2 Steel for the reinforcement and prestressing of concrete – Test methods – Part2: Welded fabric* [21].

3.1 Material

Neste estudo foi utilizado o aço A500 NR SD, laminado a quente, nervurado, soldável, de alta aderência e ductilidade especial, o qual é empregue na produção de armaduras de betão armado. Antes da aplicação do material nas linhas de produção, este deve ser testado segundo a norma *ISO 15630-1 2010 – Steel for the reinforcement and prestressing of concrete – test methods- Part1: Reinforcing bars, wire rod and wire* [22].

Os varões são produzidos por laminagem a quente a partir de semi-produtos (biletas) ou por vazamento contínuo [23].

A Figura 3.1 ilustra as diversas etapas do processo de fabrico de varão.

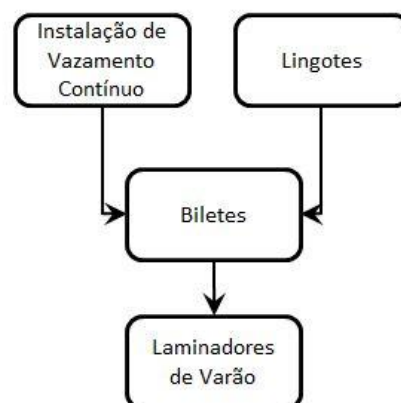


Figura 3.1 - Fluxograma de processo de fabrico de varão adaptado de Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais [4].

Os varões podem ser produzidos sob a forma de comprimento recto ou sob a forma de rolos. Neste último caso o endireitamento não é considerado processamento posterior [23].

Os valores nominais do diâmetro, da área de secção transversal e da massa por metro linear dos varões estão indicados na Tabela 3.1. Os valores de massa por metro foram obtidos considerando a área de secção transversal e a densidade, de 7.85 para o aço [23].

Tabela 3.1 - Valores nominais e tolerâncias [23].

Diâmetro nominal (mm)	Área da secção transversal (mm ²)	Massa (kg/m)	Tolerância da massa (%)
6	28,3	0,222	± 4,5
8	50,3	0,395	
10	78,5	0,617	
12	113	0,888	
14	154	1,21	
16	201	1,58	
20	314	2,47	
25	491	3,85	
32	804	6,31	
40	1257	9,86	

3.1.1 Caracterização físico-química e mecânica do material

De acordo com a norma, os valores máximos especificados, para a composição química do aço são representados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Composição química dos varões A500 NR SD [23].

Análise	C (%)	P (%)	S (%)	N ⁽¹⁾ (%)	Cu (%)	C _{eq} ⁽²⁾ (%)
Vazamento	0,22	0,050	0,050	0,012	0,80	0,50
Produto final	0,24	0,055	0,055	0,014	0,85	0,52

⁽¹⁾ Azoto Livre. Se existirem, em quantidades suficientes, elementos fixadores de Azoto tais como Alumínio, Vanádio, etc., podem ser admitidos teores superiores.

$$^{(2)} C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15} \quad (3.1)$$

onde os símbolos dos elementos químicos representam os seus valores em percentagem em peso.

Os varões são considerados soldáveis se a sua composição não ultrapassar as percentagens referidas na Tabela 3.2.

O comportamento mecânico de um provete deste material deve respeitar as características expressas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Características mecânicas [23].

R_e (MPa)	R_m/R_{eH}	R_m/R_{eL}	$R_{eH}/500$	A_{gt} (%)
500	1,15	1,35	1,20	8

3.2 Equipamento experimental

Sob a designação genérica de equipamento experimental inclui-se o equipamento para:

- Caracterização do material base,
- Controlo e aquisição do processo de SRP,
- Soldadura,
- Caracterização mecânica dos provetes e
- Caracterização estrutural.

3.2.1 Equipamento de caracterização química

Para a análise química elementar, utilizou-se um espectrómetro de fluorescência de raios-X sequencial da PANalytical, e um sistema automático de faíscamento da OXFORD INSTRUMENTS - Foundry Master.

3.2.2 Equipamento de controlo e aquisição

Foram utilizados dois *softwares* de controlo e aquisição; o LabVIEW (Figura 3.2) e o OpenChoice Desktop (Figura 3.3).



Figura 3.2 - Programa de aquisição de dados e controlo de soldadura.

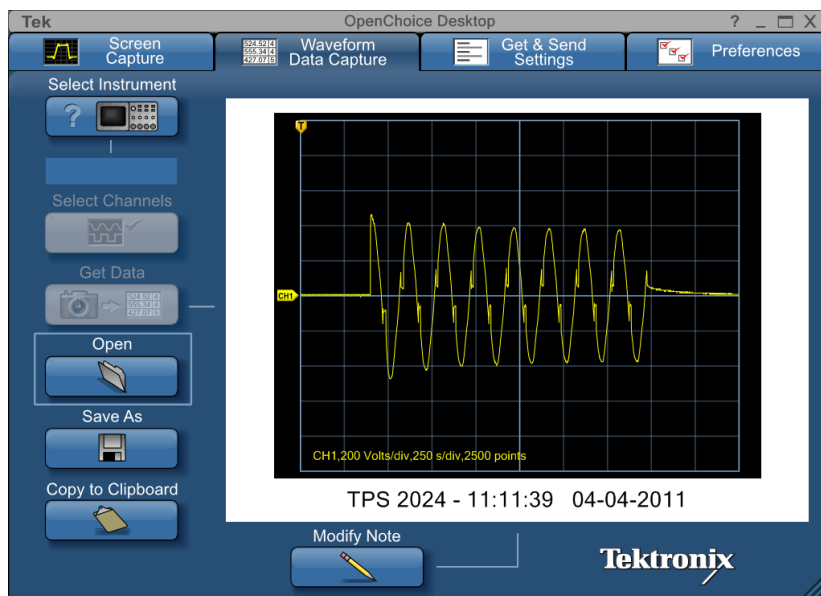


Figura 3.3 - OpenChoice Desktop.

Associado à programação, implícita na utilização do LabVIEW, está também a utilização de uma placa de aquisição e controlo da NI CompactDAQ. Em conjunto com o OpenChoice Desktop, foi utilizado um osciloscópio da Tektronix, o TPS 2024.

3.2.2.1 Equipamento de controlo

Na programação deste *software* foi incluída a possibilidade de alteração dos tempos de cada fase do processo de soldadura bem como a frequência de amostragem. Foi ainda inserida a possibilidade de calibração do sensor de força.

3.2.2.2 Equipamento de aquisição

Ao dar início ao processo, a aquisição da força foi obtida através das deformações do sensor de força (Figura 3.4) e os valores da corrente foram adquiridos através de uma bobine Rogowski. Esta bobine tem o seu princípio de funcionamento baseado na *Lei de Ampère* [13] e na *Lei de Indução de Faraday* [13], ou seja, quando um condutor se encontra no meio do toróide, o campo magnético gerado pela passagem da corrente induz um diferença de potencial (ΔV) aos terminais do toróide. Através da configuração matemática presente no manual de instruções da bobine consegue-se a conversão de volts (V) em amperes (A), os quais indicam o valor da corrente que atravessa o circuito.

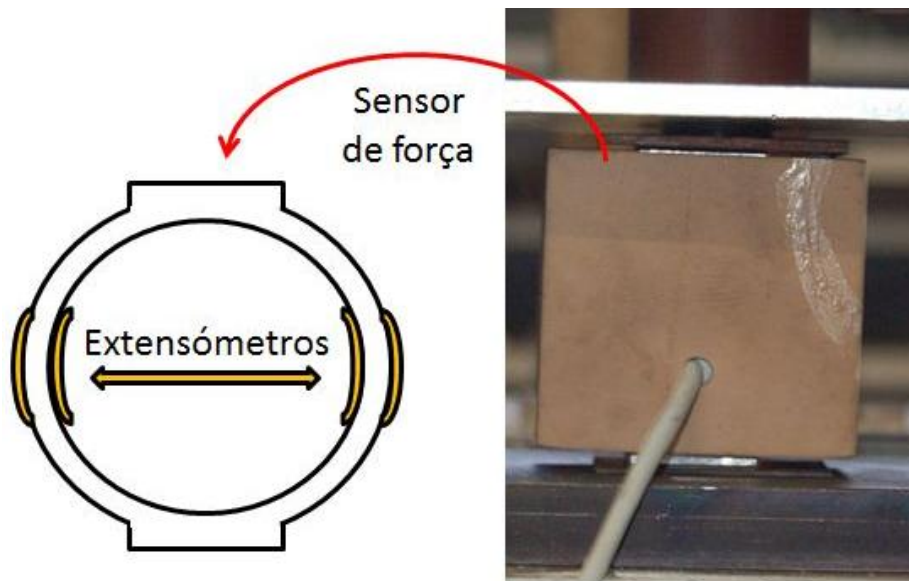


Figura 3.4 - Sensor de força.

Inicialmente tentou-se que a leitura da diferença de potencial dos eléctrodos fosse adquirida através da NI CompactDAQ, mas pelo facto de a placa não suportar as tensões envolvidas no processo foi necessário encontrar outro método. Assim utilizou-se um osciloscópio, o qual devido à sua elevada impedância, possibilitou a aquisição da queda de potencial durante o processo de soldadura. Para conseguir uma sincronização de sinais nos diferentes *hardwares* de aquisição, programou-se no LabView a geração de um sinal digital utilizado como *trigger* à aquisição do osciloscópio.

Para acerto da frequência de amostragem entre o osciloscópio e placa de aquisição, foi calculada a janela temporal de aquisição do osciloscópio, na qual é adquirido sempre o mesmo número de pontos (2500). Para obter uma frequência de amostragem de 10 kHz resolveu-se a equação (3.2), tendo originado uma janela de captação de 250 ms, em que cada divisão é de 25 ms, Figura 3.5 ($t = 250$ ms).

$$F_a = \frac{N_{aqui}}{t} \quad (3.2)$$

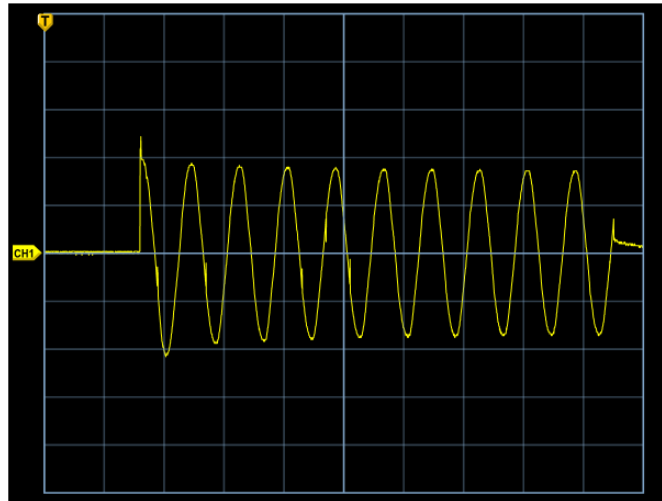


Figura 3.5 - Janela de captação do osciloscópio.

3.2.3 Equipamento de soldadura

Para os ensaios de soldadura utilizou-se um protótipo (Figura 3.6) existente na Codimetal, empresa onde se realizou o estudo, que permitia fazer ensaios fora da linha de produção, sendo semelhante ao equipamento da empresa.



Figura 3.6 - Protótipo de SRP.

Como qualquer equipamento de SRP, o protótipo, é constituído por três tipos distintos de componentes. Os do circuito eléctrico, do sistema mecânico e do equipamento de controlo.

O circuito eléctrico é constituído por disjuntores, relés, fusíveis, fonte de alimentação (os quais se encontram no armário de comando), o transformador, o qual fornece no máximo 16 kA de pico e um circuito secundário.

O equipamento mecânico deste protótipo inclui a parte estrutural, que sustenta o circuito secundário, o transformador e ainda a válvula de estado 5/2, e os componentes pneumáticos, ou seja a bomba de alta pressão, a qual atinge 400 bar, a válvula e o êmbolo.

O programa utilizado para a programação do protótipo foi o BOS - 5000, o qual possui uma plataforma gráfica conforme se pode ver na Figura 3.7. Este programa permitia uma programação prévia de diversos tipos de soldadura *standard* conforme o tipo de varão a soldar (diferentes materiais, diâmetros ou até geometrias, já que cada uma destas variáveis altera as configurações óptimas da máquina). No entanto foi utilizada a programação rápida (F11 *Quick-Prog*) já que no decorrer do estudo foram sendo alterados os parâmetros do processo.

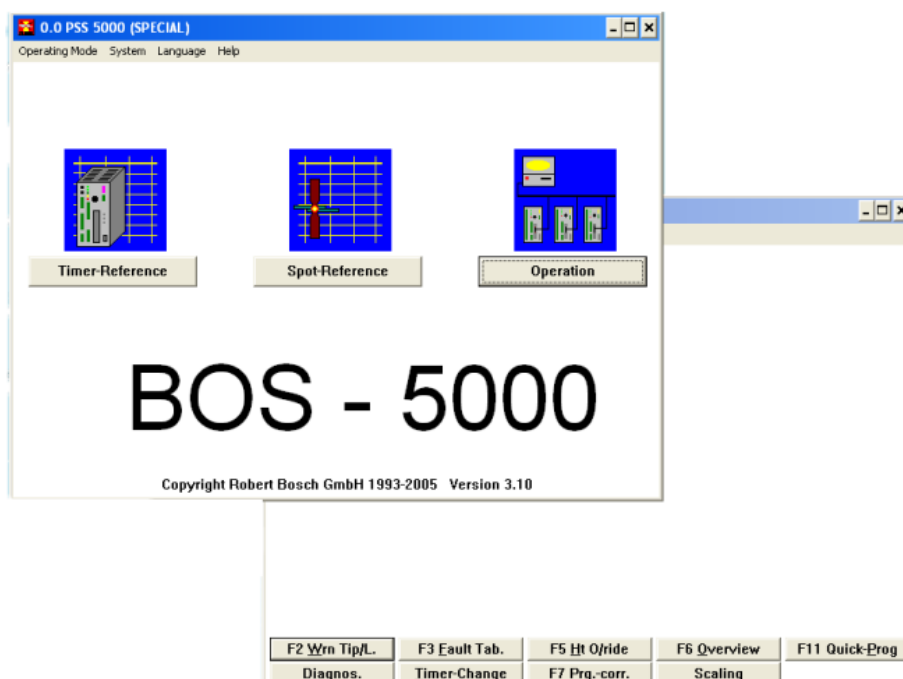


Figura 3.7 - BOS – 5000.

Os parâmetros que este programa permite controlar são diversos e permitem um controlo bastante flexível do processo, como se pode observar na Figura 3.8. Entre eles estão o número de ciclos da soldadura, a intensidade da corrente fornecida ao processo, coeficiente de desgaste dos eléctrodos, a pressão, os tempos de aperto do provete e ainda a possibilidade de programar ciclos de aquecimento e arrefecimento do material, etc... Todavia apenas foram controlados dois deles, o número de ciclos e a corrente, pois os restantes não eram compatíveis com o protótipo.

3.20 Quickprogramming Window 1

Timer: TESTES Prg.No: 0

For all Programs

Inhibit Sequ.(S): Off Max Weld Time: 99.0

Inhibit Regul.: Off Max Rewelds: 1

Weld on/off: On

Regulation-Mode

Regulation: Standard

Regulat: PHA PHA PHA

Reweld: Off

Weld Seq. Operating Mode

Inhibit Sequ.(P): Off

Weld On/Off: On

Slope: On

Elec.No: 0 Impulse: 1 1.HC a. Cool: 55.00 Sequence: Single

Sequence Timing and Heat Parameters

%Ht	0.00	0.00	80.00	0.00	0.00
kA	25.00	3.00	25.00	25.00	25.00

1.SQZ	SQZ	WELD	COOL 1	UPST	WELD	DNST	COOL 2	COOL 3	WELD	HOLD	OFF
0	2	0	0	0	10	0	0	0	0	2	0

Heat Stepper Param.

Wear-Factor: 1.0 Base Pressure: 0.00 kN

Heat	Monitor	Pressure
1.H/St Phase: 100.00	100.00	100.00
last Tip Dress: 100.00	100.00	100.00
new Electrode: 100.00	100.00	100.00

Electrode Parameters

Heat Stepper: 1. Wear:

Max. Wear:

Warn. Wear:

Dress-Request:

T/Dress:

Wear/comp.:

OK Data->Tim New Sel Prog + Prog - Page <> Act.Val Help

Inhibit Sequence (S) Communication

Figura 3.8 - Janela de programação rápida.

Foram controladas diferentes intensidades de corrente, modeladas através dos tempos “mortos”, conforme se pode observar na Figura 3.9. Assim consegue-se que a corrente transmitida à máquina, em *RMS*, seja menor devido aos períodos em que não é enviada corrente ao processo.

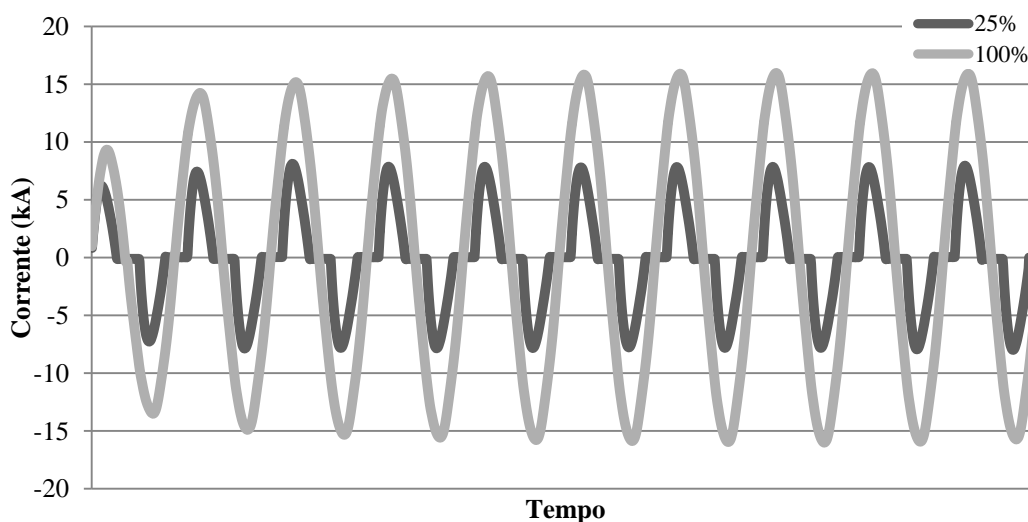


Figura 3.9 - Modulação da corrente.

3.2.4 Equipamento de caracterização mecânica

Para a caracterização mecânica de um ponto de soldadura foi utilizada uma máquina de ensaios de corte *SHIMADZU* com uma força máxima à tracção de 100 kN, a qual regista os resultados da força de corte para cada ensaio.

3.2.5 Equipamento de caracterização estrutural

O polimento das amostras foi executado através de duas polidoras/lixas da BUEHLER Pheonix Alpha. As estruturas observadas num microscópio óptico da OLYMPUS CX40, com ampliações de 50, 100, 200 e 500 vezes, um microscópio electrónico de varrimento da JEOL JSM-T330A. Os perfis de microdureza Vickers foram realizados num microdurómetro da MITUTOYO Model: HM - 124, sob uma carga de 3 N.

3.3 Planeamento

Inicialmente fez-se um planeamento utilizando o planeamento a quatro variáveis e cinco níveis, *Central Composite Design* (Composto Central Circunscrito) pois este explora um domínio mais alargado do espaço do planeamento e goza da propriedade *rotatable*¹, isto é capacidade de estimar valores, com a mesma percentagem de incerteza associada a uma distância (α) ao centro da circunferência, em qualquer direcção do domínio. A Figura 3.10 representa um caso de duas variáveis ($k=2$). Estes pontos são designado por pontos estrela e são determinados de modo a circunscrever o domínio do planeamento, ou seja, $|\alpha|>1$ [24].

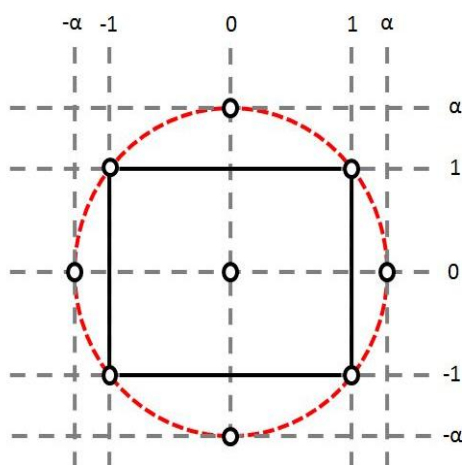


Figura 3.10 - CCC para duas variáveis (2D).

¹ Foi utilizado o termo na nomenclatura inglesa por não se ter encontrado a designação portuguesa do mesmo.

Este tipo de análise produz um polinómio de segundo grau (equação (3.3)) que representa matematicamente a função resposta do processo [25].

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_i^k \sum_{j>i}^k \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \varepsilon \quad (3.3)$$

Os coeficientes do polinómio obtido por regressão são designados por $\beta_i, \beta_j, \beta_{ii}, \beta_{ij}$. De modo a obter um modelo ajustado deve-se estimar os coeficientes $n\beta$, de acordo com a equação (3.4) [25].

$$n\beta = \frac{(k+1)(k+2)}{2} \quad (3.4)$$

A classe para ajuste de modelo polinomial de segundo grau, é denominada planeamento central composto, que consiste num factorial 2^k com um determinado número de experiências, sendo que $2k$ são experiências axiais ou estrela e n_c experiências centrais [24], ou seja:

- $n_F = 2^k$ pontos (num planeamento factorial completo) corresponde aos vários vértices de um cubo k -dimensional
 $(x_1, x_2, \dots, x_k) = (\pm 1, \pm 1, \dots, \pm 1)$;
- $2k$ pontos correspondentes aos vértices de uma estrela k -dimensional, designados por pontos estrela
 $(\pm \alpha, 0, \dots, 0), (0, \pm \alpha, \dots, 0), \dots, (0, 0, \dots, \pm \alpha)$;
- $n_C \geq 1$ pontos centrais
 $(x_1, x_2, \dots, x_k) = (\pm 1, \pm 1, \dots, \pm 1)$.

Sendo que o número total de experiências é dado por:

$$N = n_F + 2k + n_C \quad (3.5), [25]$$

As quatro variáveis consideradas neste planeamento foram: o diâmetro do varão, a corrente de soldadura, o tempo e a força de aperto, cujos níveis associados estão expressos na Tabela 3.4. É importante salientar que o tempo utilizado no planeamento foi medido em ciclos, já que esta é a unidade utilizada industrialmente (cada ciclo corresponde a 20 ms); a corrente foi expressa em percentagem do limite da máquina, que neste caso é de 16 kA; e a força foi convertida em pressão, pois o ajuste desta era feito através de um sistema hidráulico com um macaco de 40 mm de diâmetro, de acordo com a equação(3.6).

$$P = \frac{F}{A} \quad (3.6)$$

No primeiro planeamento (Tabela 3.4) detectaram-se dois problemas. O primeiro a inexistência de varão de 12 e de 14 mm de diâmetro na fábrica e o segundo prendeu-se com as limitações físicas da máquina, já que mesmo que estes dois diâmetros existissem na fábrica não existia espaço entre os eléctrodos para os soldar.

Tabela 3.4 - Planeamento 1, CCC de quatro variáveis a cinco níveis.

Planeamento 1					
Variáveis	Níveis				
	-2	-1	0	1	2
Diâmetro (mm)	6	8	10	12	14
Corrente (%)	20	40	60	80	100
Tempo (Ciclos)	4	6	8	10	12
Força (kN)	3	4	5	6	7

Assim abordou-se o problema de outro modo, efectuando um planeamento de quatro variáveis a três níveis (Tabela 3.5), eliminando os dois diâmetros de varões que impossibilitavam o planeamento anterior. Para tal projectou-se um planeamento baseado num planeamento factorial, 3^{k-p} , com as variáveis e respectivos níveis associados que se observam na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Planeamento 2, Taguchi *design* 3^{k-p} de quatro variáveis a três níveis.

Planeamento 2			
Variáveis	Níveis		
	-1	0	1
Diâmetro (mm)	6	8	10
Corrente (%)	40	70	100
Tempo (Ciclos)	6	8	10
Pressão (bar)	70	110	150

Este planeamento apesar de não possuir qualquer limitação aparente, após uma série de testes iniciais para aferir os melhores níveis para o estudo, foi detectado que mesmo a 100% de corrente, 10 ciclos e a uma pressão de 70 bar, nenhum ponto de soldadura em varões de 10 mm de diâmetro, sustentava a carga mínima necessária para a aprovação no ensaio de arranque de soldadura (Anexo A5). Assim conclui-se que devido a limitações físicas do transformador, este protótipo era incapaz de soldar varões de 10 mm entre si.

A opção encontrada foi retirar o diâmetro de variável da equação, ficando-se com três variáveis a cinco níveis.

Este planeamento possuiu três réplicas e cinco pontos centrais por réplica. Assim obtiveram-se cinquenta e sete ensaios, organizados aleatoriamente pelo *STATISTICA* (Tabela 3.6).

Tabela 3.6 - Sequência de ensaios de acordo com o planeamento definido.

Ordem dos ensaios	Ensaio	Original/ Réplica	Corrente	Tempo	Pressão
1	23	2	-1	1	1
2	16	1	0	0	0
3	14	1	0	0	1,6818
4	39	3	-1	-1	-1
5	17	1	0	0	0
6	52	3	0	0	1,6818
7	1	1	-1	-1	-1
8	13	1	0	0	-1,6818
9	53	3	0	0	0
10	8	1	1	1	1
11	32	2	0	0	-1,6818
12	18	1	0	0	0
13	33	2	0	0	1,6818
14	5	1	1	-1	-1
15	30	2	0	-1,6818	0
16	9	1	-1,6818	0	0
17	56	3	0	0	0
18	41	3	-1	1	-1
19	25	2	1	-1	1
20	15	1	0	0	0
21	55	3	0	0	0
22	49	3	0	-1,6818	0
24	48	3	1,6818	0	0
25	36	2	0	0	0
26	27	2	1	1	1
27	28	2	-1,6818	0	0
28	21	2	-1	-1	1
29	26	2	1	1	-1
30	47	3	-1,6818	0	0
31	45	3	1	1	-1
32	43	3	1	-1	-1
33	29	2	1,6818	0	0
34	42	3	-1	1	1
35	44	3	1	-1	1
36	37	2	0	0	0
37	31	2	0	1,6818	0
38	10	1	1,6818	0	0
39	24	2	1	-1	-1
40	22	2	-1	1	-1
41	4	1	-1	1	1
42	35	2	0	0	0
43	3	1	-1	1	-1
44	57	3	0	0	0
45	34	2	0	0	0
46	7	1	1	1	-1
47	40	3	-1	-1	1
48	12	1	0	1,6818	0
49	46	3	1	1	1
50	51	3	0	0	-1,6818

Ordem dos ensaios	Ensaio	Original/ Réplica	Corrente	Tempo	Pressão
51	38	2	0	0	0
52	2	1	-1	-1	1
53	19	1	0	0	0
54	54	3	0	0	0
55	50	3	0	1,6818	0
56	11	1	0	-1,6818	0
57	6	1	1	-1	1

Dado que cada diâmetro possui condições operacionais distintas, utilizando a sequência de processo, ilustrada na

Tabela 3.6, alteram-se os valores dos níveis, associados a cada um dos dois diâmetros estudados.

Os valores dos níveis utilizados foram afinados através de uma série de ensaios preliminares que nos permitiram varrer uma elevada gama de valores de pressão e corrente, sendo o número de ciclos mantido constante. Utilizou-se para este estudo o tempo usado na fábrica para a produção das malhas electrossoldadas. Os resultados deste estudo preliminar encontram-se nos anexos A2 e A3, a partir dos quais se escolheram os níveis descritos na Tabela 3.7, sendo que para os tempos tomou-se como ponto central o utilizado em produção e os pontos circundantes foram obtidos por acréscimo ou decréscimo de um ciclo.

Tabela 3.7 - Planeamento final, CCC de três variáveis a cinco níveis.

Planeamento Final										
Diâmetro	6 mm					8 mm				
Variáveis	Níveis					Níveis				
	-1,6818	-1	0	1	1,6818	-1,6818	-1	0	1	1,6818
Corrente (%)	40	45	50	55	60	70	75	80	85	90
Tempo (Ciclos)	4	5	6	7	8	6	7	8	9	10
Pressão (bar)	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80

3.4 Métodos experimentais

3.4.1 Elaboração de provetes

No decorrer deste estudo foram elaborados provetes para três tipos de ensaios caracterização;

- Do material base,
- Mecânica e
- Estrutural

Seguidamente explica-se os métodos de obtenção dos provetes para cada tipo de análise.

3.4.1.1 *Provetes para caracterização do material base*

Foram efectuados quatro provetes para metalurgia, dois para o ensaio de fluorescência de raios-X e outros dois para o faíscamento, ou seja um provete de cada diâmetro para cada análise.

Estes provetes foram obtidos por corte dum troço de varão. No ensaio de faíscamento os provetes foram esmagados, lixados (a fim de remover impurezas superficiais) e de seguida analisados, enquanto nos ensaios de fluorescência foi ainda necessário montar os varões em resina, sendo estes posteriormente lixados e analisados.

Foram ainda efectuadas duas montagens em resina com varão não soldado para observar a estrutura do material em estudo, sendo a metodologia utilizada para a produção destes provetes descrita no anexo A4.

3.4.1.2 *Provetes para ensaio de corte*

Estes provetes foram fabricados através da montagem de dois varões, cada um com cerca de 150 mm de comprimento, os quais foram colocados no protótipo, um por baixo centrado no eléctrodo e o outro por cima com a extremidade a cerca de 10 mm do outro varão, conforme ilustrado na Figura 3.11.



Figura 3.11 - Montagem do provete a soldar.

De seguida foi efectuado um aperto inicial para que os provetes não se soltassem e fosse garantida a ortogonalidade entre eles através do uso de um esquadro, desencadeando-se então o processo de soldadura.

3.4.1.3 Provetes para análise microscópica de varão soldado

Depois de se efectuar o ensaio de corte à soldadura, utilizou-se o “varão de cima”, ou seja o que tinha a soldadura efectuada a 10 mm da extremidade, para efectuar todas as montagens, tentando deste modo sistematizar o processo.

Para fazer a montagem, o varão foi cortado num disco de corte refrigerado pelo centro da zona de fusão do varão, sendo aproveitada a parte mais curta para a montagem.

3.4.2 Análise química

Para análise química elementar utilizou-se um espectrómetro de fluorescência de raios X sequencial, com dispersão em comprimentos de onda, AXIOS de 4 kW da PANalytical, equipado com uma ampola de ródio. As análises químicas foram efectuadas em fluxo de hélio, sendo a semi-quantificação efectuada com o programa SuperQ IQ+.

Para o ensaio de faíscamento colocou-se a amostra sobre uma câmara de vácuo, de seguida foi efectuada uma descarga e através dos electrões que se libertaram do material, foi feita a sua análise espectral, detectando-se deste modo os elementos químicos constituintes do aço.

3.4.3 Processo de soldadura

Para a realização da soldadura existiam três postos operacionais.

Primeiro em que se colocava os varões no protótipo, em segundo lugar, inseriam-se no BOS - 5000 os parâmetros de cada ponto a soldar e finalmente através do computador em que estava instalado o LabView iniciava-se o processo de soldadura.

3.4.4 Caracterização mecânica

Antes de se efectuar a soldadura, os varões foram caracterizados através de ensaios de tracção uniaxial, segundo a norma *ISO 15630-1 2010 – Steel for the reinforcement and prestressing of concrete – test methods- Part1: Reinforcing bars, wire rod and wire* [22].

O ensaio de caracterização mecânica dos pontos soldados por resistência foi realizado segundo a norma *ISO 15630-2 Steel for the reinforcement and prestressing of concrete – Test methods – Part2: Welded fabric* [21] e consistiu na colocação dum provete numa máquina de tracção, efectuando a tracção conforme se observa na Figura 3.12, sendo o valor obtido registado manualmente.

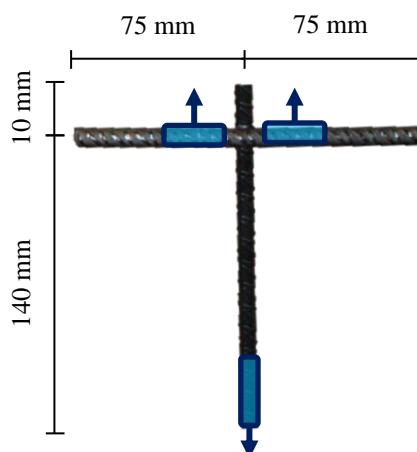


Figura 3.12 - Representação dos pontos de aplicação da força de corte, num provete electrossoldado, num ensaio de corte à soldadura.

3.4.5 Caracterização estrutural

Para a análise microscópica começou-se por efectuar uma montagem, em resina epóxi, de cada diâmetro do aço (6 e 8 mm) sem estar soldado para se verificar a constituição do material base.

De seguida foram efectuadas as montagens das amostras em resina epóxi (o método de escolha das amostras está descrito capítulo 4), das amostras foram tiradas imagens dos seus constituintes e perfis de microdurezas, para facilitar na identificação dos constituintes.

Os perfis de micro durezas foram efectuados sob uma carga de 3 N e para cada amostra foram efectuados dois perfis paralelos, a uma distância de 0,5 mm entre eles, sendo os valores apresentados, nas figuras, as médias de cada par de perfis.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo apresentam-se e discutem-se os resultados deste estudo. Estes foram divididos por tipo de análise, sendo a primeira a caracterização do material base, seguida da caracterização mecânica dos pontos electrossoldados e finalmente a caracterização estrutural das ligações.

4.1 Caracterização do material base

O material base foi caracterizado segundo a sua composição química, comportamento mecânico e microestrutura.

Para uma análise química do material quantitativa do material seria necessário realizar um ensaio de espectroscopia de massa ao aço, mas por indisponibilidade de equipamento para realizar este ensaio, foram executadas duas análises semiquantitativas, uma de faíscamento e outra por de fluorescência de raios X sequencial.

Os resultados da análise de fluorescência de raios X sequencial e do faíscamento estão expostos na Tabela 4.1, para varão de 6 mm e na Tabela 4.2, para varão de 8mm, sendo os valores apresentados para o faíscamento a média de três análises ao material. Estas análises são limitadas, por serem semiquantitativas. O ensaio de fluorescência de raios X apresenta a dificuldade de não detectar elementos químicos com baixos pesos atômicos, como o carbono, e elementos não metálicos como o fósforo e o azoto, por exemplo.

Tabela 4.1 - Análise química, varão de 6 mm.

Elemento	Ensaio de fluorescência de raios-X	Ensaio de faíscamento
	Percentagem (%)	Percentagens (%)
Al	2	0,0424
S	0,2	0,0566
Cr	0,1	0,127
Mn	1	1,61
Fe	96	96,9
Cu	0,458	0,363
C		0,212
P		0,0331
N		< 0,003

Tabela 4.2 - Análise química, varão de 8 mm.

Elemento	Ensaio de fluorescência de raios-X	Ensaio de faíscamento
	Percentagem (%)	Percentagens (%)
Al	2	0.0098
S	0,06	0,0373
Cr	0,1	0,105
Mn	1	1,26
Fe	96	97,5
Cu	0,8	0,451
C		0,175
P		0,0507
N		< 0,003

No ensaio de fluorescência de raios-X, os valores de alumínio registados aparentam ser superior ao esperado, tal facto é possível dever-se a uma calibração inadequada do cristal que detecta este elemento.

A vermelho assinalam-se os valores que ultrapassa os limites impostos pela especificação de material. Isto é os valores do enxofre são superiores ao especificado, excepto no ensaio de faíscamento do varão de 8 mm. Observa-se ainda a presença de diversos elementos de liga não referidos pela norma [23], os quais afectam a soldabilidade do material.

Os ensaios mecânicos, que comprovam a conformidade do material (Tabela 4.3 e Tabela 4.4), foram realizados segundo as especificações da norma *ISO 15630-1 2010 – Steel for the reinforcement and prestressing of concrete – test methods- Part1: Reinforcing bars, wire rod and wire* [22].

Tabela 4.3 - Média dos ensaios mecânicos dos varões de 6 mm.

6 mm	Varão simples	Valor da norma
R_e [MPa]	527,94	500
R_m / R_{eH}	1,27	1,15 - 1,35
A_{gt} [%]	8,32	8

Tabela 4.4 - Média dos ensaios mecânicos dos varões de 8 mm.

8 mm	Varão simples	Valores da norma
R_e [MPa]	542,87	500
R_m / R_{eH}	1,20	1,15 – 1,35
A_{gt} [%]	11,49	8

A caracterização estrutural do material base foi feita por microscopia óptica, electrónica e microdurezas.

Uma primeira observação em microscopia óptica do material base, sem contrastação, revelou a presença de uma quantidade significativa de inclusões alinhadas segundo a direcção de laminagem que se ilustra na Figura 4.1 e na direcção perpendicular (Figura 4.2). Esta observação está de acordo com as análises químicas efectuadas que revelam uma percentagem de enxofre superior ao valor máximo admitido pela norma.

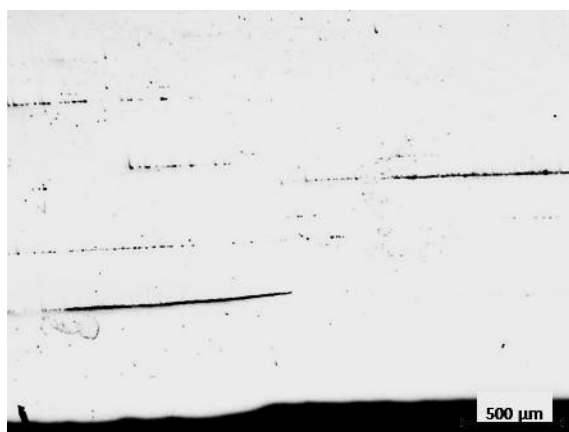


Figura 4.1 – Fotomicrografia corte longitudinal de varão não soldado, antes do ataque químico, em que se vê pequenas inclusões no material, observado no microscópio óptico.

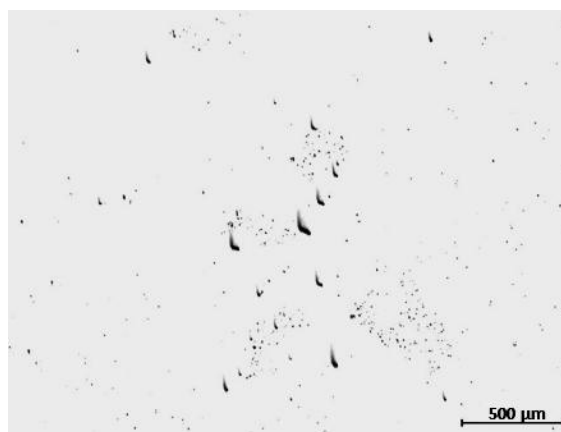


Figura 4.2 – Fotomicrografia corte transversal de varão não soldado, antes do ataque químico, em que se vê pequenas inclusões no material, observado no microscópio óptico.

Após a contrastação verificou-se que o material apresentava uma estrutura ferrítico-perlítica de grão muito fino, orientada segundo a direcção de trefilagem de varão (Figura 4.3) e equiaxial na direcção perpendicular (Figura 4.4).

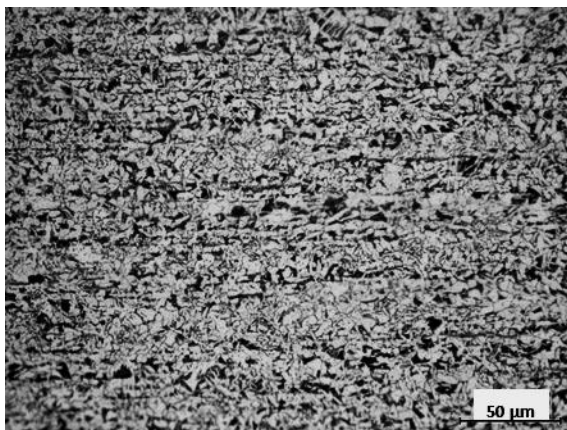


Figura 4.3 – Fotomicrografia de um corte longitudinal de varão não soldado, depois do ataque químico, observado no microscópio óptico.

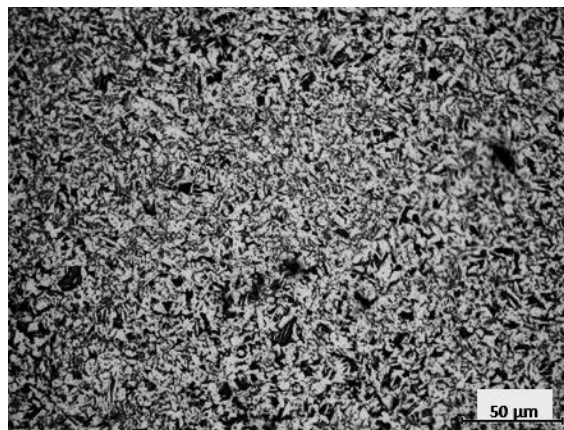


Figura 4.4 – Fotomicrografia de um corte transversal de varão não soldado, depois do ataque químico, observado no microscópio óptico.

Verifica-se ainda que as estruturas constituintes dos aços para os diâmetros de varão de 6 e 8 mm não apresentam diferenças como se pode observar pela Figura 4.5 e Figura 4.6.

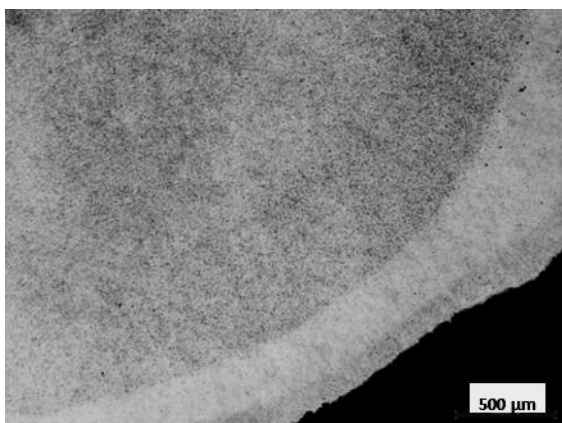


Figura 4.5 – Fotomacrografia de material base, varão de 6 mm diâmetro, observado no microscópio óptico.

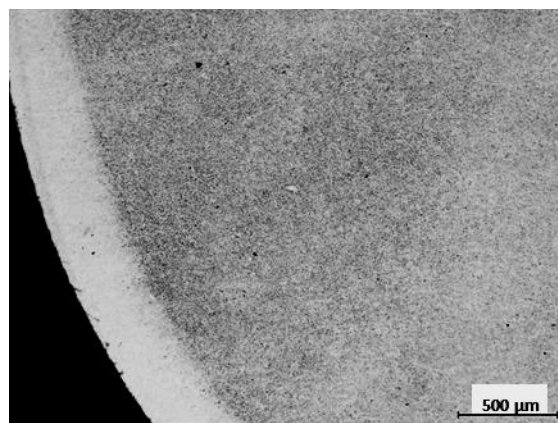


Figura 4.6 – Fotomacrografia de material base, varão de 8mm diâmetro, observado no microscópio óptico.

É possível detectar nestas imagens a presença de uma zona nuclear do varão, constituída por ferrite e perlite (Figura 4.4) e outra na periferia mais clara que corresponde a uma zona decarbonizada, típica do processo de trefilagem (método de obtenção destes varões). Esta última zona tem uma constituição predominantemente ferrítica, quase a 100 %, como se observa na Figura 4.7.

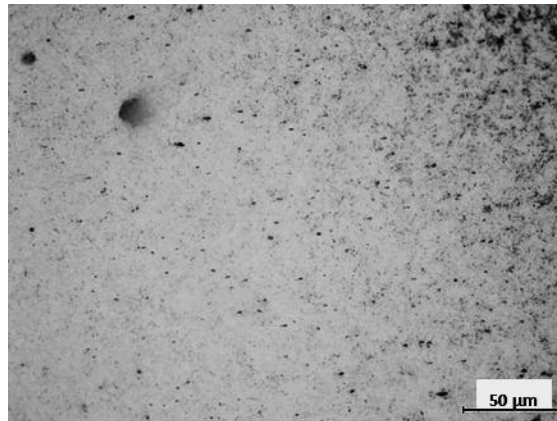


Figura 4.7 – Fotomicrografia da periferia do varão, observado no microscópio óptico.

Através dos perfis de microdurezas realizados aos provetes comprovou-se a existência das duas zonas referidas anteriormente, Figura 4.8.

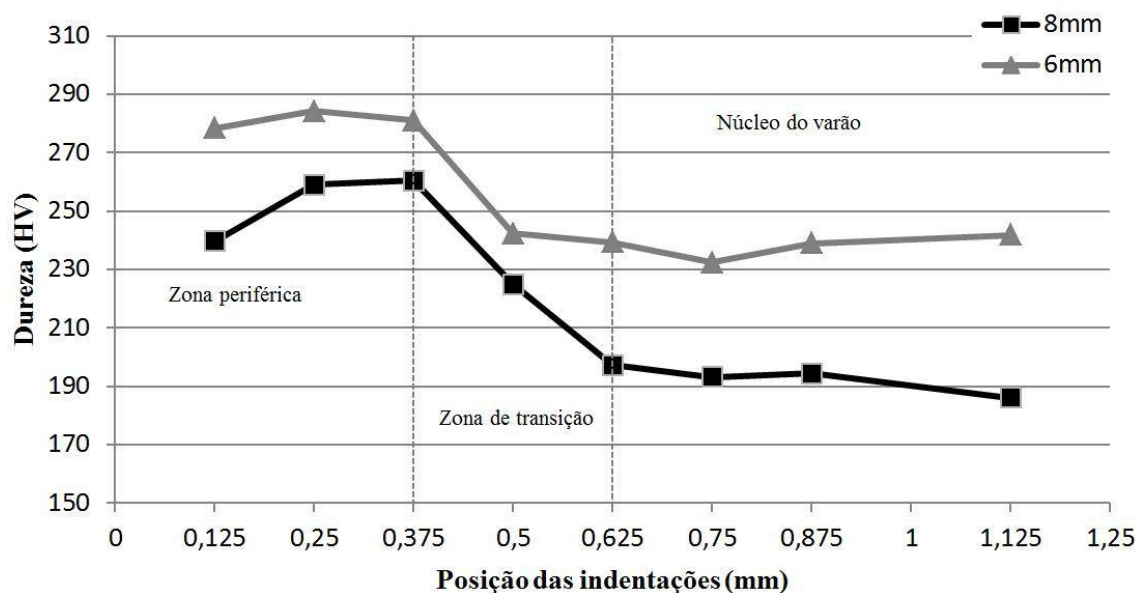


Figura 4.8 - Distribuição de durezas médias, a partir da periferia de varões não soldados.

A zona da periferia, apesar de ter menos percentagem de carbono é mais dura. Este acréscimo na dureza é devido à deformação plástica que o material sofre durante o processo de trefilagem e possivelmente devido à presença de elementos martensíticos disseminados ao longo da zona periférica.

4.2 Caracterização mecânica dos pontos de soldadura

O valor da força que cada ponto electrossoldado deve sustentar, consoante o diâmetro, está descrito na norma *ISO 15630-2 Steel for the reinforcement and prestressing of concrete – Test methods – Part2: Welded fabric* [21] conforme se indica na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Características mecânicas de aprovação do ponto electrossoldado [21].

Diâmetro (mm)	Força de corte mínima (N)
6	4245
8	7545

Através da análise de variância (ANOVA) foi possível estabelecer a importância relativa de cada parâmetro e suas inter-relações, para cada diâmetro de varão, através da introdução dos resultados das forças de corte no programa *STATISTICA*.

4.2.1 Varão com diâmetro de 6 mm

A Tabela 4.7 mostra a influência associada a cada um dos parâmetros e suas relações na força de corte. Na Tabela 4.6, assinalam-se a verde os parâmetros e relações que apresentam a maior importância. Com base nestes valores foram calculados os coeficientes do polinómio de 2º grau, que representa a função resposta do processo (Tabela 4.5).

Tabela 4.6 - Tabela ANOVA referente aos factores influentes na força de corte de soldadura para o varão de 6mm (*STATISTICA*).

ANOVA; Var.:Fcorte; R-sqr=,61618; Adj:,54269 (6mm.sta) 3 factors, 1 Blocks, 57 Runs; MS Residual=5994850, DV: Fcorte					
Factor	SS	df	MS	F	p
I (%Ht) L	236840452	1	236840452	39,50732	0,000000
I (%Ht) Q	1214332	1	1214332	0,20256	0,654729
t (ciclos) L	63227263	1	63227263	10,54693	0,002151
t (ciclos) Q	1845202	1	1845202	0,30780	0,581665
p (bar) L	88683687	1	88683687	14,79331	0,000360
p (bar) Q	485400	1	485400	0,08097	0,777238
I (%Ht) x t (ciclos)	41448817	1	41448817	6,91407	0,011522
I (%Ht) x p (bar)	7571267	1	7571267	1,26296	0,266799
t (ciclos) x p (bar)	10827267	1	10827267	1,80609	0,185429
Error	281757967	47	5994850		
Total SS	734098014	56			

Tabela 4.7 - Tabela de efeitos estimados referente aos factores mais influentes na força de corte (varão de 6 mm)

Effect Estimates; Var.:Fcorte; R-sqr=,58603; Adj:,55418 (6mm.sta)										
3 factors, 1 Blocks, 57 Runs; MS Residual=5844188, DV: Fcorte										
6mm										
<i>Factor</i>	<i>Effect</i>	<i>Std. Err.</i>	<i>t(52)</i>	<i>p</i>	<i>-95,% Cnf. Limt</i>	<i>+95,% Cnf. Limt</i>	<i>Coeff.</i>	<i>Std. Err. Coeff.</i>	<i>-95,% Cnf. Limt</i>	<i>+95,% Cnf. Limt</i>
<i>Mean/Interc.</i>	10415,44	320,2025	32,52766	0	9772,91	11057,97	10415,44	320,2025	9772,91	11057,97
<i>Corrente (%calor)</i>	4808,64	755,3637	6,36599	0	3292,89	6324,38	2404,32	377,6819	1646,44	3162,19
<i>Força (bar)</i>	-2942,5	755,3637	-3,89547	0,000281	-4458,24	-1426,75	-1471,25	377,6819	-2229,12	-713,37
<i>Tempo (ciclos)</i>	2484,54	755,3637	3,2892	0,001807	968,79	4000,29	1242,27	377,6819	484,4	2000,14
<i>Corrente (%calor) x Tempo (ciclos)</i>	2628,33	986,9303	2,66314	0,010281	647,91	4608,75	1314,17	493,4651	323,96	2304,38

A função resposta dada pelo *STATISTICA* para a força de corte de varões de 6 mm de diâmetro é a seguinte:

$$Fcorte = 10415,44 + 2404,32 I + 1242,27 t - 1471,25P + 1314,17 I t \quad (4.1)$$

Com, $\{I, t, P\} \in \mathbb{R}$

Analisando a variação da força de corte com o tempo e a corrente para os três níveis (máximo, mínimo e central) da pressão de aperto, verifica-se que a força de corte aumenta muito com a corrente. Embora também cresça com o tempo, esta variação é menos acentuada, como se pode observar na Figura 4.9 e Figura 4.10.

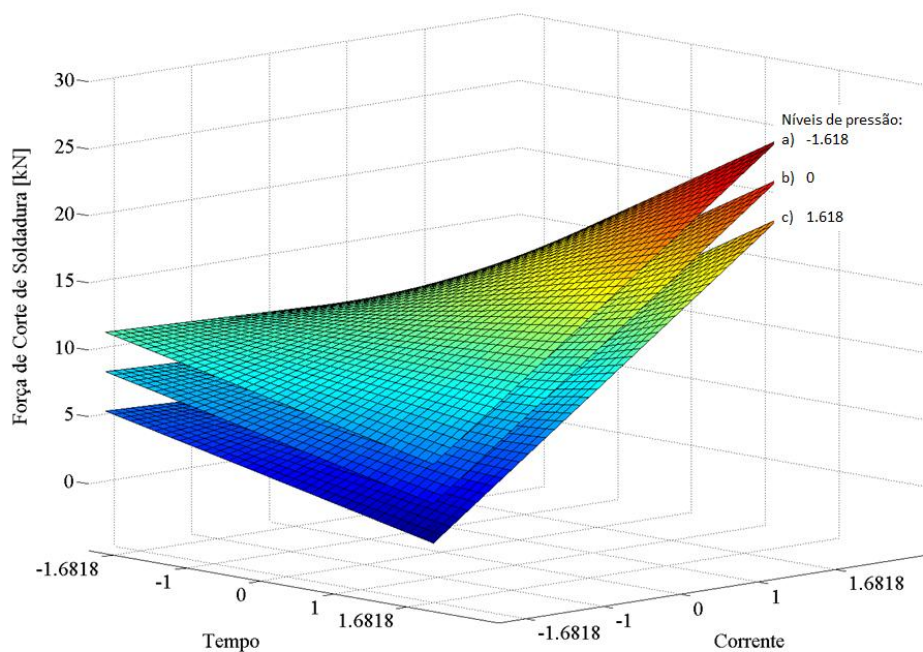


Figura 4.9 - Função resposta da força de corte (tempo eixo XX' e corrente no YY') para os níveis -1,618; 0; 1,618, da pressão (de realçar que a superfície que apresenta maior valor de força de corte corresponde ao nível -1,618, a que possui menor valor simboliza o nível 1,618 e a do meio o nível 0; varão de 6 mm)

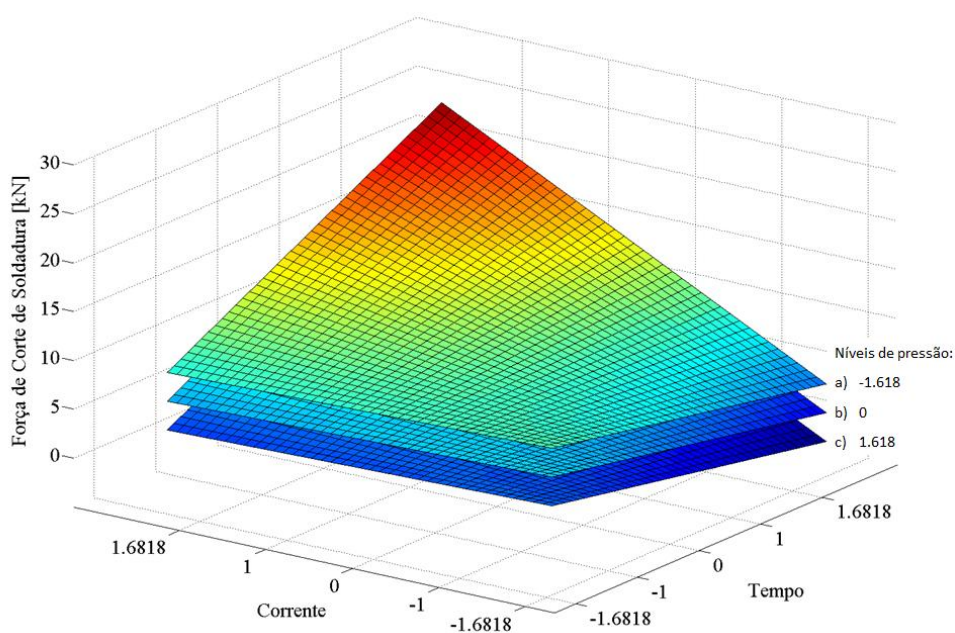


Figura 4.10 - Função resposta da força de corte (tempo eixo XX' e corrente no YY') para os níveis -1,618; 0; 1,618, da pressão (de realçar que a superfície que apresenta maior valor de força de corte corresponde ao nível -1,618, a que possui menor valor simboliza o nível 1,618 e a do meio o nível 0; varão de 6 mm)

Para uma visualização mais correcta das superfícies de resposta, sentiu-se a necessidade das representar através das duas figuras anteriores, uma vez que só deste modo se consegue compreender o paralelismo entre as superfícies a diferentes pressões (Figura 4.9) e a simetria existente na direcção diagonal aos dois eixos (Figura 4.10).

Pode-se reorganizar a tabela do anexo A5, ordenando-a segundo a importância dada a cada parâmetro pela Tabela 4.7, surgindo assim a Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Resultados do varão de 6mm organizados por importância de parâmetros.

Ordem Ensaio	I (%)	T (ciclos)	P (bar)	Ensaio de Corte I (N)	Ensaio de Corte II (N)	Força de Corte			Diferença (%)
						Mínimo (N)	Máximo (N)	Média (N)	
16	40	6	45	8540	5800	5120	13340	7243,333	62%
27	40	6	45	13340	5140				
30	40	6	45	5520	5120				
4	45	5	40	9920	7520	7520	11660	9480	36%
7	45	5	40	11660	8160				
23	45	5	40	10720	8900				
28	45	5	50	7720	5000	3960	7720	6143,333	49%
47	45	5	50	3960	7460				
52	45	5	50	7680	5040				
18	45	7	40	5680	14640	5680	14640	8280	61%
40	45	7	40	6540	5680				
43	45	7	40	8740	8400				
1	45	7	50	3500	4920	3500	12300	7360	72%
34	45	7	50	12300	4700				
41	45	7	50	11500	7240				
15	50	4	45	12300	11000	4780	12300	9006,667	61%
22	50	4	45	8600	11000				
56	50	4	45	6360	4780				
8	50	6	35	8140	9620	8140	16100	8803,333	49%
11	50	6	35	9420	14500				
50	50	6	35	14900	16100				
2	50	6	45	15780	7300	4740	19380	10541,25	76%
5	50	6	45	8940	11760				
9	50	6	45	9560	15440				
12	50	6	45	13540	15260				
17	50	6	45	15280	14860				
20	50	6	45	5280	7400				
21	50	6	45	7020	10020				
25	50	6	45	13420	11880				
36	50	6	45	4740	6440				
42	50	6	45	14360	5680				
44	50	6	45	8300	11600				
45	50	6	45	9080	19380				
51	50	6	45	6060	7840				
53	50	6	45	8220	5560				
54	50	6	45	6460	9860				

Ordem Ensaio	I (%)	T (ciclos)	P (bar)	Ensaio de Corte I (N)	Ensaio de Corte II (N)	Força de Corte			Diferença (%)
						Mínimo (N)	Máximo (N)	Média (N)	
3	50	6	55	5500	5560	5500	9640	7776,667	43%
6	50	6	55	9640	9640				
13	50	6	55	7660	9400				
37	50	8	45	9140	14200	5400	20780	12823,33	74%
48	50	8	45	20060	7360				
55	50	8	45	5400	20780				
14	55	5	40	11660	13020	10700	17460	13326,67	39%
32	55	5	40	17460	10700				
39	55	5	40	14260	12860				
19	55	5	50	14960	9080	4060	14960	7473,333	73%
35	55	5	50	4060	4440				
57	55	5	50	4980	7320				
29	55	7	40	16760	15940	11560	20300	17113,33	43%
31	55	7	40	20140	11560				
46	55	7	40	20300	17980				
10	55	7	50	11940	12280	9620	20680	14216,67	53%
26	55	7	50	9620	17760				
49	55	7	50	20680	13020				
24	60	6	45	16560	9380	9380	17660	14360	47%
33	60	6	45	13280	15100				
38	60	6	45	17660	14180				

Na Figura 4.11 observa-se o comportamento da função resposta da força de corte em ordem à corrente (parâmetro mais influente no estudo do comportamento do varão de 6 mm de diâmetro), mantendo fixos os valores da pressão (no nível 0, ou seja, 45 bar) e do tempo (também no nível 0, isto é, 6 ms). Apresentam-se ainda os valores da mediana e os valores mínimos e máximos, da força de corte de todos os provetes ensaiados para os níveis 0 da pressão de aperto e do tempo.

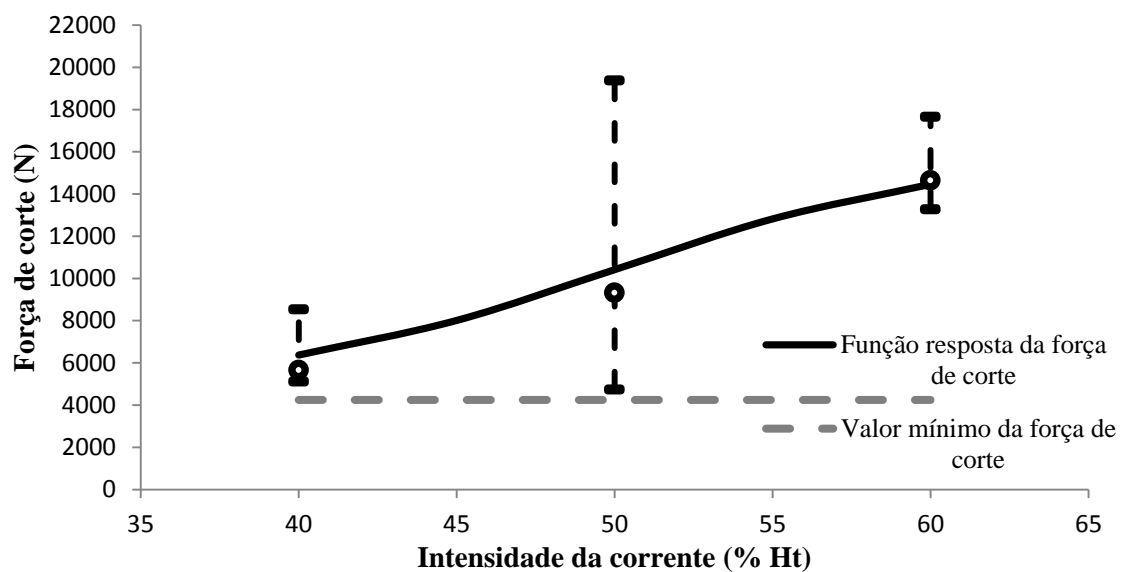


Figura 4.11 - Representação da função resposta da força de corte, para varões com 6mm de diâmetro, com os valores de pressão e tempo fixos nos pontos centrais do planeamento.

O comportamento desta está conforme o descrito na literatura disponível, e embora estes estudos sejam quase sempre em chapas, é de realçar que o comportamento das funções resposta em varão é bastante semelhante ao das chapas [26,27]

4.2.2 Varão com diâmetro de 8 mm

Inserindo os valores de força registados nos ensaios de corte ao varão de 8 mm, no STATISTICA, obtém-se a Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Tabela ANOVA referente aos factores influente na força de corte de soldadura para varão de 8mm (STATISTICA).

ANOVA; Var.:Fcorte; R-sqr=,59054; Adj:,51214 (8mm.sta) 3 factors, 1 Blocks, 57 Runs; MS Residual=5173167, DV: Fcorte					
Factor	SS	df	MS	F	p
I (%Ht) L	92880400	1	92880400	17,95426	0,000105
I (%Ht) Q	6526967	1	6526967	1,26170	0,267035
t (ciclos) L	192485009	1	192485009	37,20835	0,000000
t (ciclos) Q	5230670	1	5230670	1,01112	0,319785
p (bar) L	36285673	1	36285673	7,01421	0,010975
p (bar) Q	7239016	1	7239016	1,39934	0,242784
I (%Ht) x t (ciclos)	256060	1	256060	0,04950	0,824904
I (%Ht) x p (bar)	1170858	1	1170858	0,22633	0,636460
t (ciclos) x p (bar)	12875885	1	12875885	2,48898	0,121354
Error	243138845	47	5173167		
Total SS	593810086	56			

Utilizando a metodologia descrita na secção 4.2.1, obtém-se a Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Tabela de efeitos estimados referente aos factores mais influentes na força de corte de soldadura para varão de 8mm (STATISTICA).

Effect Estimates; Var.:Fcorte; R-sqr=,59054; Adj:, 51214 (8mm.sta) 3 factors, 1 Blocks, 57 Runs; MS Residual=5173167, DV: Fcorte										
8mm										
Factor	Effect	Std. Err.	t(52)	p	-95,% Cnf. Limt	+95,% Cnf. Limt	Coeff.	Std. Err. Coeff.	-95,% Cnf. Limt	+95,% Cnf. Limt
Mean/Inter.	16094,58	300,1484	53,62208	0	15492,56	16696,6	16094,58	300,1484	15492,56	16696,6
Tempo (ciclos)	4335,03	708,0557	6,12245	0	2914,85	5755,21	2167,52	354,0279	1457,43	2877,61
Corrente (%calor)	3011,31	708,0557	4,25293	0,000086	1591,13	4431,49	1505,66	354,0279	795,57	2215,75
Força (bar)	-1882,18	708,0557	-2,65824	0,010362	-3302,36	-462	-941,09	354,0279	-1651,18	-231

Sendo a função resposta da força de corte de provetes com varão de 8 mm electrossoldados dada por:

$$Fcorte = 16094,58 + 1505,66 I + 2167,52 t - 462 P \quad (4.2)$$

Com, $\{I, t, P\} \in \{\mathbb{R}\}$

Através da representação gráfica da força de corte com o tempo e a corrente para três níveis (máximo, mínimo e central) da pressão de aperto, verifica-se que a força de corte aumenta mais com o tempo do que com a corrente (Figura 4.12).

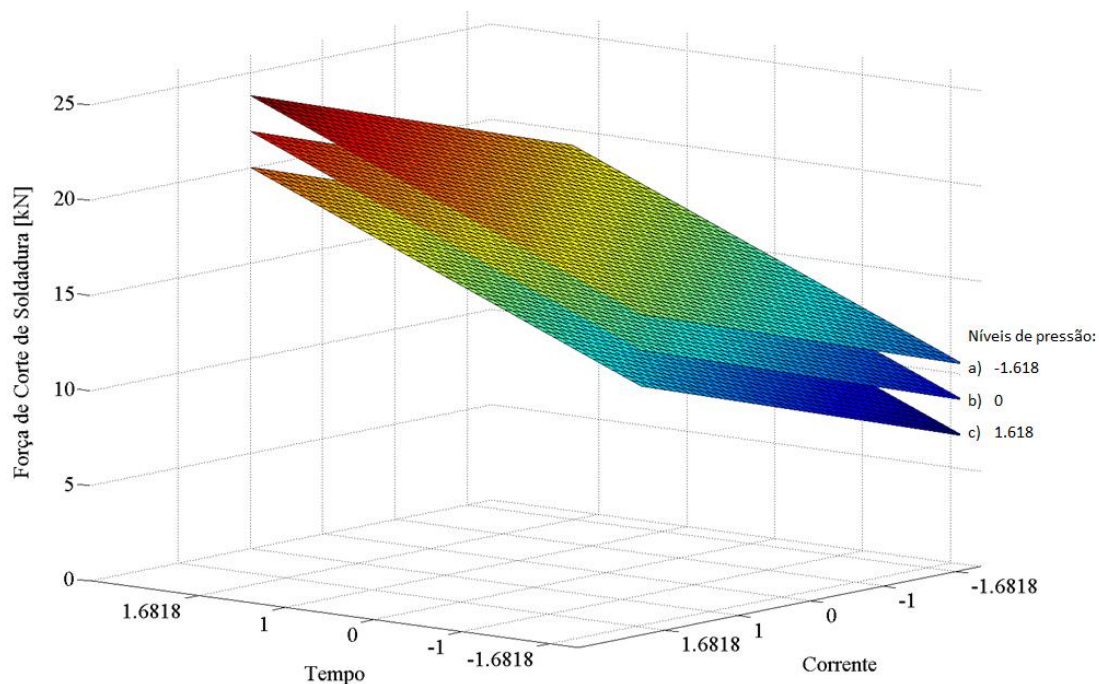


Figura 4.12 - Função resposta da força de corte (tempo eixo XX' e corrente no YY') para os níveis - 1,618; 0; 1,618, da pressão (de realçar que a superfície que apresenta maior valor de força de corte corresponde ao nível -1,618 e a que possui menor valor simboliza o nível 1,618; varão de 8 mm).

A Tabela 4.11 é obtida reorganizando a tabela presente no anexo A6, segundo a importância dada a cada factor pela Tabela 4.10.

Tabela 4.11 - Resultados do varão de 8mm organizados por importância de parâmetros.

Ordem Ensaio	I (%)	t (ciclos)	P (bar)	Ensaio de Corte I (N)	Ensaio de Corte II (N)	Força de Corte			Diferença (%)
						Mínimo (N)	Máximo (N)	Média (N)	
15	80	6	70	10100	15080	8660	15080	10686,667	43%
22	80	6	70	8660	11120				
56	80	6	70	9000	10160				
4	75	7	65	8140	17660	8140	17660	13790	54%
7	75	7	65	15360	16200				
23	75	7	65	16200	9180				
28	75	7	75	13720	12060	9140	21220	14566,667	57%
47	75	7	75	17460	9140				
52	75	7	75	13800	21220				
14	85	7	65	11640	18340	11640	22200	17790	48%
32	85	7	65	22200	21440				
39	85	7	65	18200	14920				
19	85	7	75	22220	12360	11480	22220	15210	48%
35	85	7	75	12840	11480				
57	85	7	75	20440	11920				
16	70	8	70	13540	12400	9480	13560	12326,667	30%
27	70	8	70	11540	13440				
30	70	8	70	9480	13560				

Ordem Ensaio	I (%)	t (ciclos)	P (bar)	Ensaio de Corte I (N)	Ensaio de Corte II (N)	Força de Corte			Diferença (%)
						Mínimo (N)	Máximo (N)	Média (N)	
8	80	8	60	13440	17600	13040	22920	16500	43%
11	80	8	60	14540	13040				
50	80	8	60	22920	17460				
2	80	8	70	14260	13240	11120	21660	15313,333	49%
5	80	8	70	14700	15560				
9	80	8	70	15020	12260				
12	80	8	70	11120	14920				
17	80	8	70	12540	21660				
20	80	8	70	11540	16020				
21	80	8	70	14780	14560				
25	80	8	70	18060	19700				
36	80	8	70	17440	11600				
42	80	8	70	14140	15680				
44	80	8	70	13880	14780				
45	80	8	70	18240	20980				
51	80	8	70	13980	14100				
53	80	8	70	15980	16440				
54	80	8	70	17200	15020				
3	80	8	80	17740	13840	10960	17740	14486,667	38%
6	80	8	80	16320	10960				
13	80	8	80	12180	15880				
24	90	8	70	21220	14000	14000	23920	18540	41%
33	90	8	70	23920	16540				
38	90	8	70	17460	18100				
18	75	9	65	25280	15420	15420	25280	19793,333	39%
40	75	9	65	21140	17000				
43	75	9	65	18540	21380				
1	75	9	75	18980	12940	10460	20580	15167	49%
34	75	9	75	10460	13560				
41	75	9	75	20580	14482				
29	85	9	65	17600	26000	17320	26000	21733,333	33%
31	85	9	65	24800	20960				
46	85	9	65	17320	23720				
10	85	9	75	20020	17100	14380	22520	18696,667	36%
26	85	9	75	21760	14380				
49	85	9	75	22520	16400				
37	80	10	70	23880	22640	14060	23880	19943,333	41%
48	80	10	70	16240	23800				
55	80	10	70	14060	19040				

Na Figura 4.13 ilustra-se o comportamento da função resposta da força de corte, mantendo fixos os valores da pressão (em 0, ou seja, 70 bar) e da corrente (0, isto é, 80% Ht), em ordem ao tempo. Na Figura 4.13 representam-se os valores da mediana e os respectivos valores mínimos e máximos, da força de corte de todos os provetes ensaiados no nível 0 da pressão e da corrente.

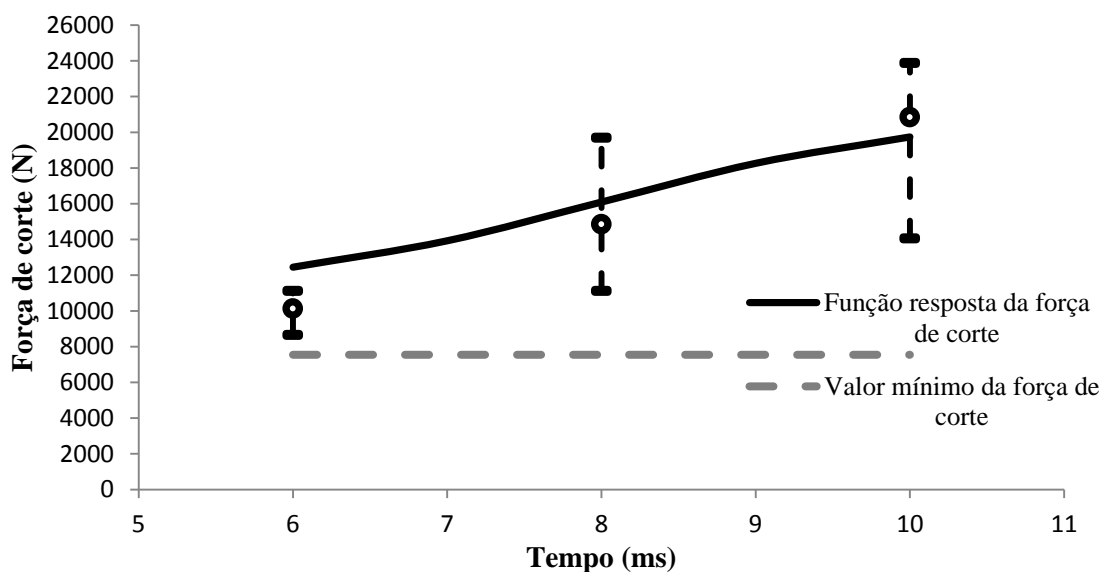


Figura 4.13 - Representação da função resposta da força de corte, para varões com 8mm de diâmetro, com os valores de pressão e corrente fixos nos pontos centrais do planeamento.

É possível encontrar em artigos análises semelhantes a estas, efectuadas em chapas, que demonstram um comportamento análogo ao que se observaram [27]. Naturalmente os declives das funções resposta variam consoante o material em estudo e as condições em que se realizam os ensaios.

4.3 Caracterização estrutural

Foi efectuada uma análise de caracterização estrutural em provetes soldados nos varões com diâmetros de 6 e 8 mm. As diferenças encontradas na estrutura observada nas diferentes zonas de soldadura não eram significativamente distintas pelo que se faz uma análise conjunta dos dois tipos de material.

Verificou-se a presença de quatro zonas distintas em cada montagem de varão soldado, conforme se ilustra na Figura 4.14.

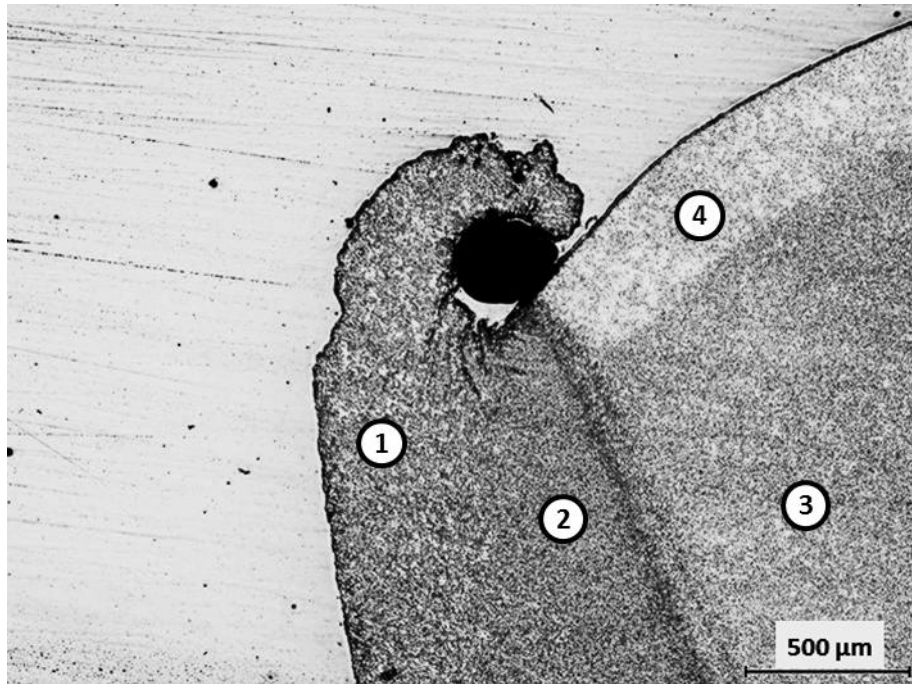


Figura 4.14 – Fotomicrografia de um provete soldado, observado no microscópio óptico:

1 – Zona de fusão,	2 – ZTA do varão montado,
3 – Núcleo do varão e	4 – Zona periférica do varão.

Observando em microscopia óptica cada uma destas zonas, verifica-se uma estrutura bainítica superior na zona fundida ilustrada na Figura 4.15 e Figura 4.16. Na Figura 4.17 observa-se a zona de transição da ZTA, constituída por uma estrutura de bainíte inferior (Figura 4.18), para o material base do varão, constituído por ferrite primária e perlite (Figura 4.19).

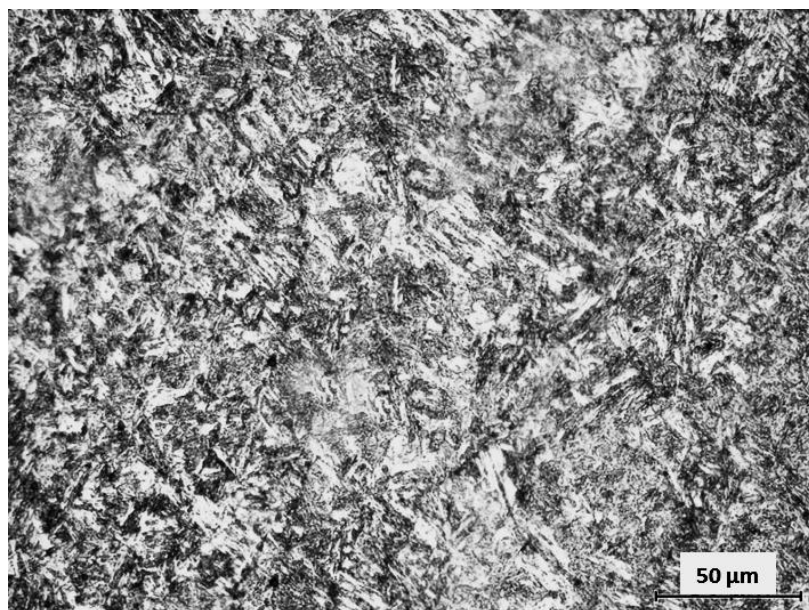


Figura 4.15 - Fotomicrografia da zona de fusão de um provete de varão soldado, observada em microscopia óptica.

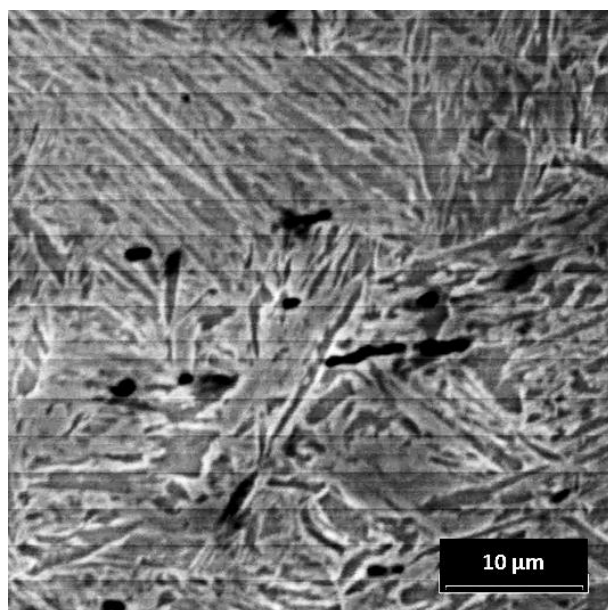


Figura 4.16 – Fotomicrografia da zona de fusão de um provete de varão soldado observada em SEM.

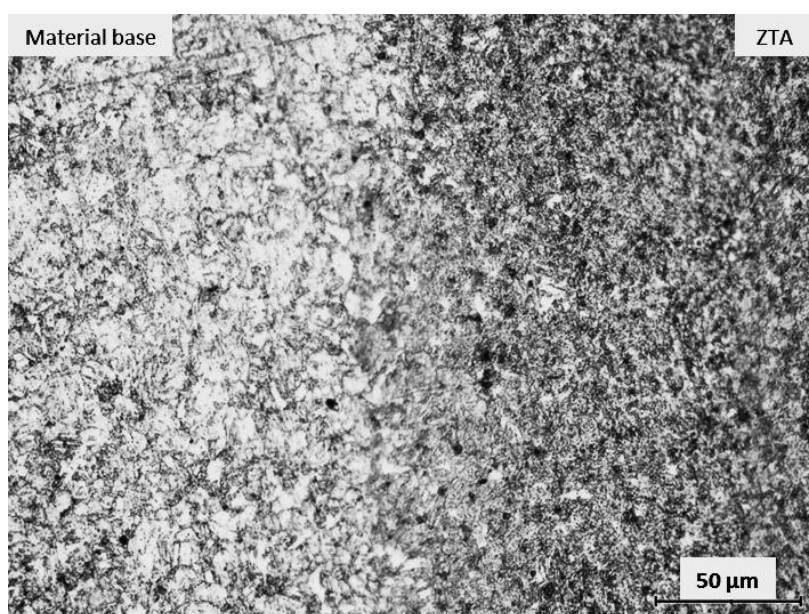


Figura 4.17 – Fotomicrografia da transição da ZTA para o material base de um provete de varão soldado, observada em microscopia óptica.

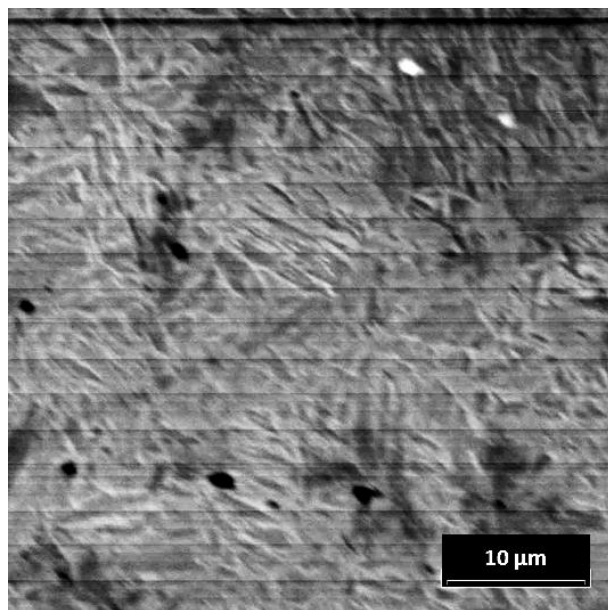


Figura 4.18 - Fotomicrografia da ZTA de um varão soldado, observada em SEM.

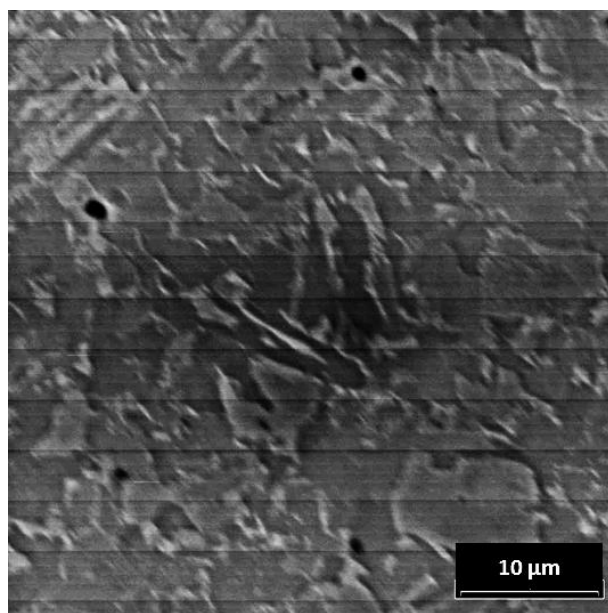


Figura 4.19 - Fotomicrografia do material base de um provete de varão soldado, observada em SEM.

Para cada diâmetro de varão foi analisada a estrutura de três provetes a que correspondem as variações mínima, máxima e central do parâmetro mais influente. Por razões de facilidade de interpretação são designadas por IA e IB para os diâmetros de 6 e 8 mm, respectivamente.

Para realizar estas montagens foram escolhidos os provetes cujas forças de corte eram mais próximas do valor médio de cada condição operatória, conforme se observa na Tabela 4.12 e Tabela 4.13.

Tabela 4.12 - Análise IA varão de 6 mm.

Montagem	Parâmetros			Força média dos ensaios com os mesmos parâmetros (N)	Provete com valor de força mais próximo	Calor gerado pelo sistema (kJ)
	I (%)	t (Ciclos)	P (bar)			
1a	40	6	45	7243,33	16F1	1,52
2a	50	6	45	10152,38	21F2	1,95
3a	60	6	45	14360,00	38F1	2,38

Tabela 4.13 - Análise IB varão de 8 mm.

Montagem	Parâmetros			Força média dos ensaios com os mesmos parâmetros (N)	Provete com valor de força mais próximo	Calor gerado pelo sistema (kJ)
	I (%)	t (Ciclos)	P (bar)			
1b	80	6	70	10686,67	22F2	3,11
2b	80	8	70	15313,33	5F2	4,06
3b	80	10	70	19943,33	55F2	5,05

Esta análise consistiu na medição da dimensão da zona de fusão, através de um programa de análise de imagem. Este programa permite o cálculo desta zona através de um polígono de medição, determinando a sua dimensão através da escala da imagem que se estava a tratar, conforme o ilustrado na Figura 4.20.

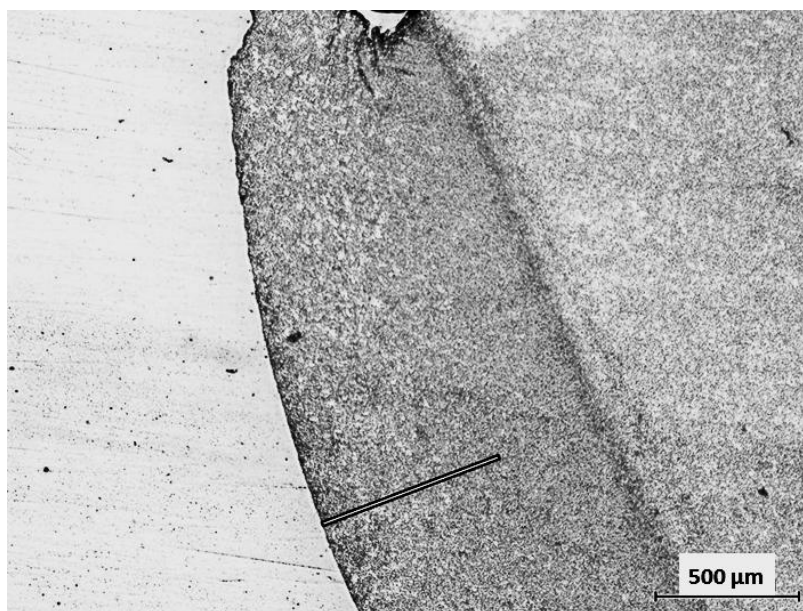


Figura 4.20 – Fotomicrografia do método de medição da zona de fusão de um varão soldado, observado em microscopia óptica.

A extensão das zonas fundidas provou ser consistente com o observado por Hong-Seok Choi, et al [26]. Isto é, verificam-se um aumento do tamanho do núcleo de soldadura com o aumento do

factor mais importante. A extensão das zonas fundidas é apresentada na Tabela 4.14 para varões de 6mm de diâmetro e Tabela 4.15 para os varões de 8 mm.

Tabela 4.14 - Dimensões das zonas soldadas, análise IA, varão de 6 mm.

Provete	Tamanho, aproximado, da zona de fusão (µm)
1a	630
2a	688
3a	728

Tabela 4.15 - Dimensões das zonas soldadas, análise IB, varão de 8 mm.

Provete	Tamanho, aproximado, da zona de fusão (µm)
1b	648
2b	853
3b	922

Da Tabela 4.14 verifica-se que o aumento da intensidade de corrente origina um aumento na extensão da zona de fusão de cerca de 0,1 mm. Para o varão de 8 mm o aumento do tempo de soldadura conduz a um aumento da zona fundida de cerca de 0,28 mm. De salientar que apesar do provete 1b possuir uma maior entrega térmica (superior à 3ª), a zona fundida é inferior, pois o provete 1b foi, possivelmente, arrefecido mais rapidamente que o 3a, já que está sujeito a uma pressão mais elevada.

Para complemento desta análise foram ainda efectuados perfis de microdurezas em cada um dos provetes, como se pode observar nas figuras que se seguem.

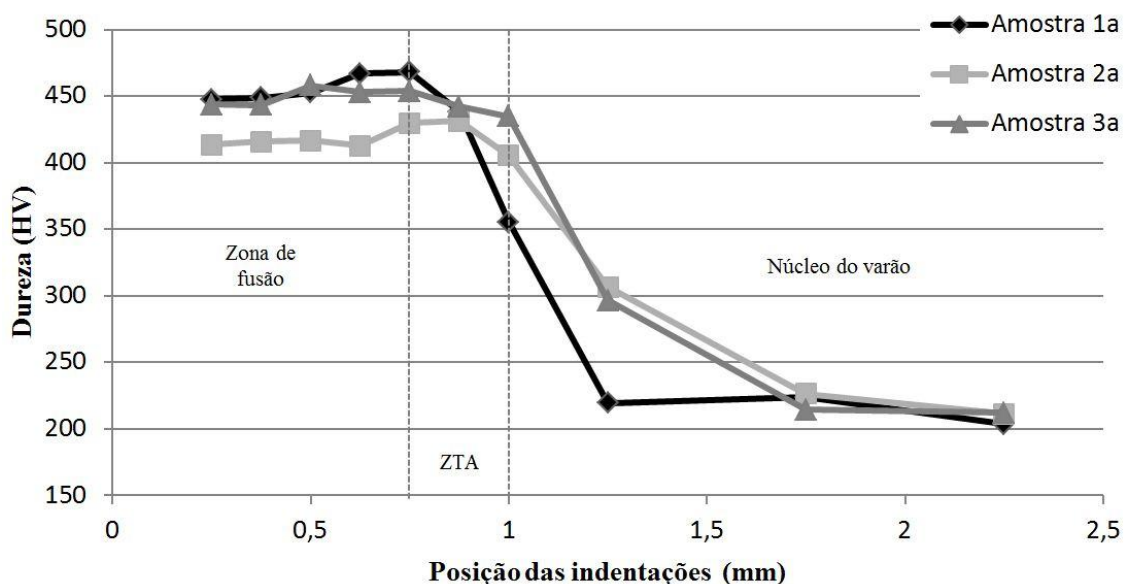


Figura 4.21 - Distribuição de durezas médias, a partir da periferia dos varões utilizados para o estudo do crescimento das ZTA's, nos varões de 6 mm.

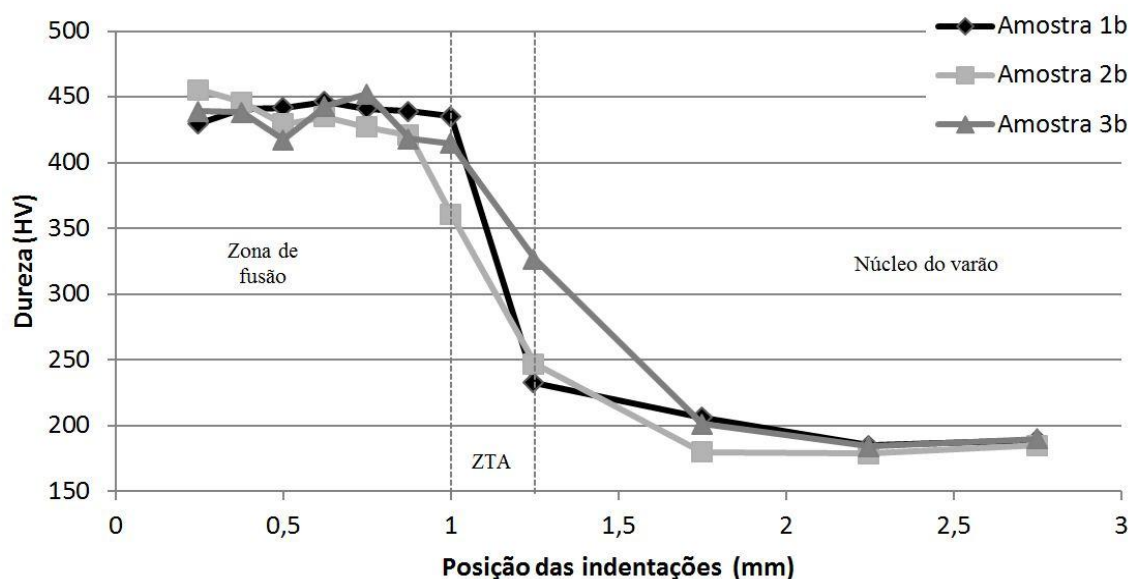


Figura 4.22 - Distribuição de durezas médias, a partir da periferia dos varões utilizados para o estudo do crescimento das ZTA's, nos varões de 8 mm.

Na zona de fusão a microdureza está sempre acima dos 400 HV devido à estrutura bainítica do material. No varão de 8 mm o decréscimo de dureza na ZTA é mais acentuado do que no varão de 6 mm sugerindo um arrefecimento mais rápido.

Foi ainda efectuada uma segunda análise na qual são observados os dois provetes, que nas mesmas condições operatórias, apresentaram a maior discrepância de valores de força de corte. Estas análises foram designadas por IIA para 6 mm e IIB para 8 mm. Esta segunda análise foi realizada uma vez que experimentação se verificou que provetes soldados nas mesmas condições, apresentavam valores de forças de corte muito díspares, chegando a atingir 76% de diferença.

Os provetes utilizados para realizar este estudo foram os que, para cada diâmetro, apresentaram maior diferença de força de corte registada. Nas tabelas abaixo apresentam-se os parâmetros dos provetes analisados.

Tabela 4.16 - Análise IIA varão de 6 mm.

Montagem	Parâmetros			Força de corte (N)	Maior discrepância dos valores da força para 6mm (%)	Provete	Calor gerado pelo sistema (kJ)
	I (%)	t (Ciclos)	P (bar)				
4a	50	6	45	4740	76	36F1	1,90
5a	50	6	45	19380		45F2	1,99

Tabela 4.17 - Análise IIB varão de 8 mm.

Montagem	Parâmetros			Força de corte (N)	Maior discrepância dos valores da força para 8mm (%)	Provete	Calor gerado pelo sistema (kJ)
	I (%)	t (Ciclos)	P (bar)				
4b	75	7	75	9140	57	47F2	3,37
5b	75	7	75	21220		52F2	3,37

O primeiro aspecto que se teve em conta nesta análise foi o tamanho do núcleo de soldadura de cada provete. Observando-se os valores referidos nas tabelas que se seguem.

Tabela 4.18 - Dimensões das zonas soldadas, análise IIA, varão de 6 mm.

Provete	Tamanho, aproximado, da zona de fusão (μm)
4a	706
5a	728

Tabela 4.19 - Dimensões das zonas soldadas, análise IIB, varão de 8 mm.

Provete	Tamanho, aproximado, da zona de fusão (μm)
4b	720
5b	700

Tal como seria expectável, visto que as entregas térmicas do processo foram sensivelmente as mesmas, verifica-se, pela Tabela 4.18 e Tabela 4.19, a disparidade de força de corte observada para cada provete não provém do núcleo de soldadura. De modo a explicar esta discrepância nos valores das forças de corte, foram realizados perfis de microdureza, que se apresentam na Figura 4.23 e Figura 4.24 para os varões de 6 e 8 mm, respectivamente.

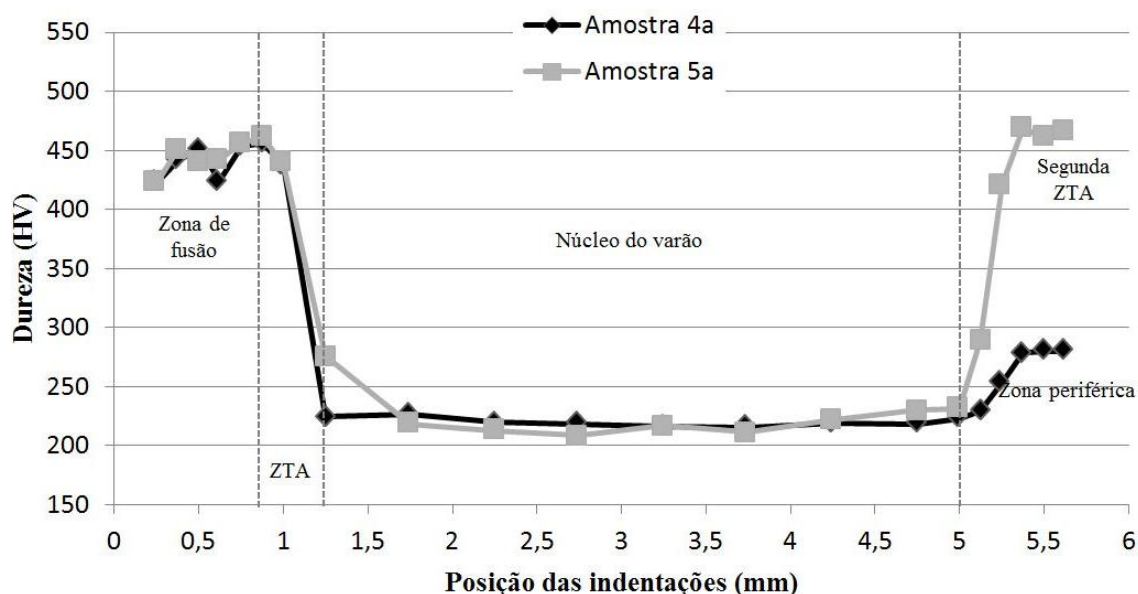


Figura 4.23 - Distribuição de durezas médias, a partir da periferia dos varões utilizados para análise da maior discrepância de forças medidas, nos varões de 6 mm.

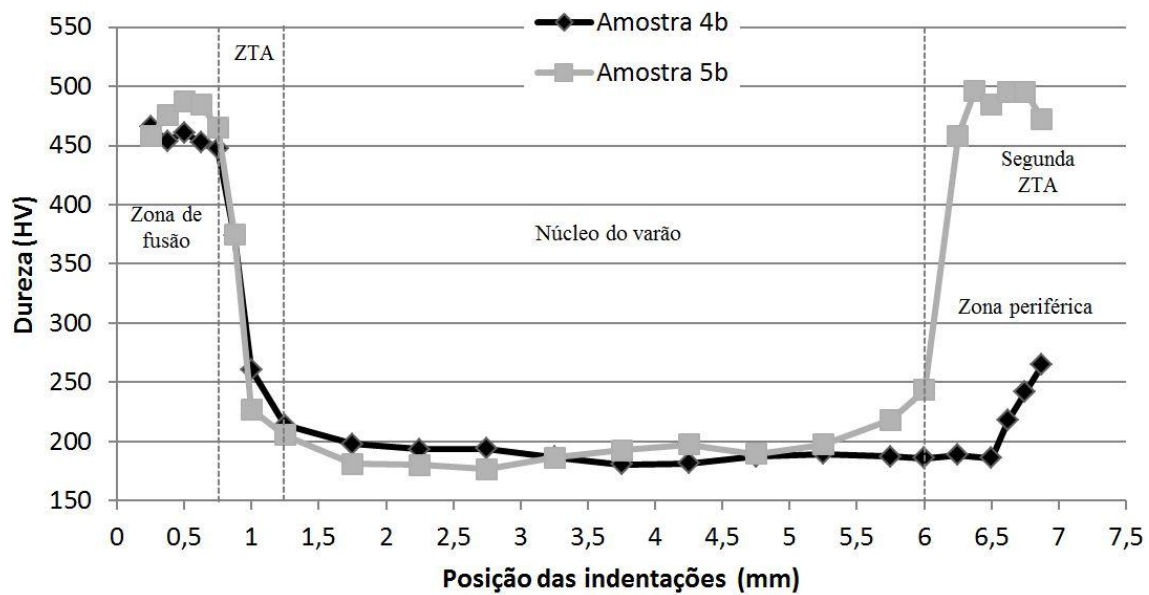


Figura 4.24 - Distribuição de durezas médias, a partir da periferia dos varões utilizados para análise da maior discrepância de forças medidas, nos varões de 8 mm.

Assim identificou-se a presença de uma segunda ZTA no provete que apresentou maior força ao corte durante o ensaio de tracção. Estas segundas ZTA's, podem ser observadas nas Figura 4.25 e Figura 4.26 e estão localizadas na zona de contacto varão/eléctrodo. Este facto sugere que nalgumas situações, na zona de contacto varão/eléctrodo, a resistência local aumenta e o calor desenvolvido por efeito de joule localiza-se nesta interface, originando uma ZTA que aumenta a resistência global do ponto soldado.

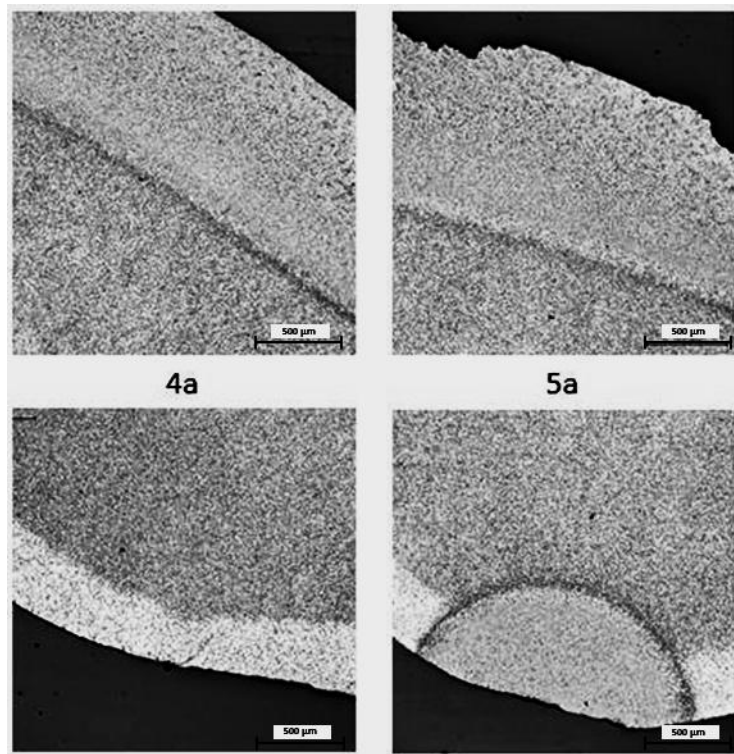


Figura 4.25 - Comparação das zonas de contacto varão/varão (imagens de cima) e varão/eléctrodo (imagens de baixo), aparecimento de uma segunda ZTA no provete com maior força ao corte; no diâmetro de 6 mm, em microscopia óptica.

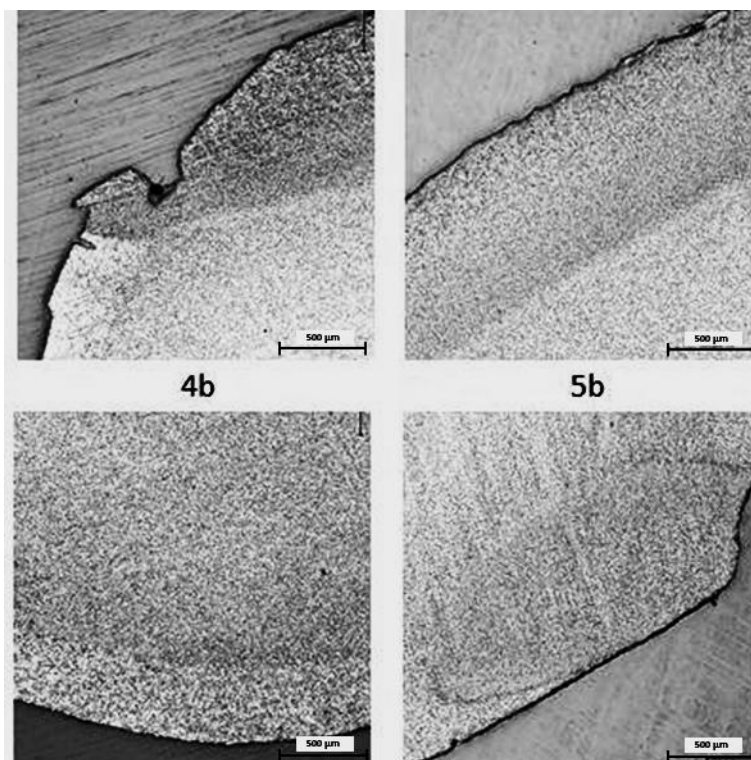


Figura 4.26 - Comparação das zonas de contacto varão/varão (imagens de cima) e varão/eléctrodo (imagens de baixo), aparecimento de uma segunda ZTA no provete com maior força ao corte; no diâmetro de 8 mm, em microscopia óptica.

5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Com este estudo foi possível concluir que existem diversos elementos de liga que influenciam a soldabilidade do aço, nomeadamente o enxofre. Devido à presença de inclusões orientadas segundo a direcção de laminagem podem existir modificações das propriedades físicas dos varões e falta de homogeneidade. Isto é heterogeneidade química, mecânica e estrutural. Alguns provetes de material base estudados estavam fora das especificações, nomeadamente nos varões de 6 mm de diâmetro.

Verificou-se que este processo conduz a uma grande variabilidade dos resultados da força de corte.

Observou-se a presença de quatro zonas distintas num varão após a sua soldadura:

- Zona fundida – onde se observa uma estrutura de solidificação constituída por bainite superior,
- ZTA – nesta zona encontra-se uma bainite inferior,
- O núcleo do varão – onde o material base permanece inalterado, constituído por ferrite primária e perlite e
- A periferia do varão – onde se observa a presença predominante de ferrite primária com perlite, uma vez que o material se encontra descarbonizado devido ao seu processo de fabrico (trefilagem).

Através de estudo observa-se que a importância que a corrente, o tempo e a pressão exercem no processo de SRP, para varões de aço, varia consoante o diâmetro do varão com que se trabalha. A justificação física para tal efeito não é fácil de encontrar e muito menos garantir, uma vez que nesta análise estatística não se consideraram outros parâmetros que afectam o processo, apenas os mais importantes foram tomados em conta. Desta análise pode-se concluir que para a obtenção de uma análise mais rigorosa do processo seria necessário considerar o diâmetro como parâmetro do processo. De qualquer modo, os dois modelos matemáticos encontrados permitem determinar aprioristicamente a força de corte expectável para uma soldadura por resistência por pontos mas, conforme se observou no decorrer do estudo, os valores das forças de arranque das soldaduras possuem uma grande dispersão mesmo em condições operatórias análogas.

Assim fez-se uma caracterização estrutural dos varões electrossoldados em que apenas se modificou o parâmetro mais influente. Isto é, analisou-se o efeito da intensidade de corrente na zona de fusão dos varões soldados com 6 mm de diâmetro. No carão com 8 mm de diâmetro

estudou-se o efeito do tempo na zona de fusão. O comportamento observado está conforme o descrito na literatura para SRP em chapas.

Variando os parâmetros de processo, do ponto de vista estrutural, não foi encontrada uma variação microestrutural que justifique as variações observadas na força de corte.

Observou-se nalgumas condições, a existência de uma ZTA no contacto do varão com o eléctrodo, a qual aumenta a resistência global do ponto de soldadura. Tal facto pode dever-se às condições superficiais do material a soldar, a sua composição química e estrutural e ao estado da superfície dos eléctrodos, já que estes factores são importantes na obtenção dos pontos soldados.

Os perfis de microdureza, medidos são independentes do diâmetro de varão e das condições operatórias estudadas, já que os valores de microdurezas obtidos eram bastante semelhantes, o que está de acordo com o descrito por outros autores [26,28,29,30].

5.2 Desenvolvimentos futuros

Como perspectivas de trabalho futuro seria interessante a realização do primeiro planeamento experimental. Isto implicaria alterações profundas ao protótipo, começando pelas garras de aperto (as quais suportam no máximo varões de 10 mm), passando pela substituição do transformador do equipamento. Seria ainda interessante a realização de um estudo semelhante a este, mas com um equipamento que permitisse a realização de diversos pontos de soldadura em simultâneo. Finalmente, seria importante avaliar o efeito do tempo na vida dos eléctrodos nas características dos pontos electrossoldados, uma vez que a zona afectada pelo calor na zona de interacção eléctrodo/varão deve estar relacionada com o estado da superfície do eléctrodo.

6 BIBLIOGRAFIA

- [1] Charles G. Salmon and John E. Johnson, *Steel Structures - Design and Behavior*, 4th ed. Nova Iorque, Estados Unidos da America: HarperCollins, 1996.
- [2] Emmanuel K. Attiogbe, Benoît Bissonnette Matthew A. Miltenberger, "Behavior of conventional reinforcement and a steel-polypropylene fiber blend in slabs-on-grade," *Materials and Structures*, vol. 40, 3, pp. 279-288, Janeiro 2007.
- [3] LNEC, "Redes Electrossoldadas para Armaduras de Betão Armado," Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Documentação Normativa E 458 - 2008, 2008.
- [4] William Smith, *Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*, 3rd ed. Nova Iorque, Estados Unidos da America: Mc Graw-Hill, 1998.
- [5] Jean Barralis and Gérard Maeder, *Prontuário de metalurgia*, 1st ed. Lisboa, Portugal: Fundação Calouste Gulbenkian, 2005.
- [6] R.C. Gifkins, "Metallography – History and Development," *Materials Australia*, vol. 33, 1, pp. 11-13, Janeiro/Fevereiro 2001.
- [7] Hongyan Zhang and Jacek Senkara, *RESISTANCE WELDING - Fundamentals and Applications*, 1st ed. Londres, Reino Unido: Taylor & Francis Group, 2005.
- [8] James Sheire. (1975, July) National Register of Historic Places Inventory-Nomination: Elihu Thomson House / Elihu Thomson Administration Building. [Online]. <http://pdfhost.focus.nps.gov/docs/NHLS/Text/76002002.pdf>
- [9] José F. Oliveira Santos and Luísa Quintino, *Processos de Soldadura*, 2nd ed. Oeiras, Portugal: Instituto de Soldadura e Qualidade, 1998.
- [10] Helena Maria Fazendeiro Pardal Monteiro, "Estudo Paramétrico de optimização de Soldadura por Resistência Eléctrica por Pontos," Universidade do Porto, Porto, Tese de Mestrado 2000.
- [11] Roger Timings, *Fabrication and welding engineering*, 1st ed. Oxford, Inglaterra: Elsevier, 2008.
- [12] A.C. Davis, *The science and practice of welding - Volume 2 - The practice of welding*, 10th ed. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 1993.

- [13] James Clerk Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism*, 1st ed. Cambridge, Inglaterra: Clarendon press series, 1873, vol. 1.
- [14] Yunus A. Çengel and Michael A. Boles, *Thermodynamics, An engineering approach*, 5th ed. Nova Iorque, Estado Unidos da America: McGraw-Hill, 2005.
- [15] AWS, *Resistance and Solid-State Welding and Other Joining Processes*, 7th ed. Florida, Estados Unidos da América: American Welding Society, 1980.
- [16] H. Tang, W. Hou, and S. J. Hu, "Forging force in resistance spot welding," *Professional Engineering Publishing*, vol. 216, 7, pp. 957-968, Julho 2002.
- [17] Hongyan Zhang and Jacek Senkara, *RESISTANCE WELDING - Fundamentals and Applications*, 1st ed. Nova Iorque, Estados Unidos da América: Taylor & Francis Group, 2006.
- [18] UNITEK, "Fundamentals of small parts resistance welding," MIYACHI UNITEK, Holanda, 2006.
- [19] B. E. Rossi, *Welding Engineering*, 3rd ed. Nova Iorque, Estado Unidos da América: McGraw-Hill, 1954.
- [20] Технологии (Comércio, Tecnologia) Торговли. (2011, Agosto) Технологии Торговли (Tecnologia comércio). [Online]. <http://standes-tt.ru/company/>
- [21] ISO, "Steel for the reinforcement and prestressing of concrete - Test methods - Part 2: Welded fabric," International Standard, Genova, Documento Normativo ISO 15630-2:2010, 2010.
- [22] ISO, "Steel for the reinforcement and prestressing of concrete - Test methods - Part 1: Reinforcing bars, wire rod and wire," International Standard, Genova, Documento Normativo ISO 15630-2:2010, 2010.
- [23] LNEC, "Varões de Aço A500 NR de Ductilidade Especial para Armaduras de Betão Armado," Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Documentação Normativa E460 - 2010, 2010.
- [24] Douglas C. Montgomery, *Design And Analysis Of Experiments*, 5th ed. ARIZONA STATE UNIVERSITY, United States of America: JOHN WILEY & SONS, INC., 2001.
- [25] C. F. Jeff Wu and Michael Hamda, *Experiments, planning, analysis, and parameter design*

optimization, 1st ed. New York, United States of America: JOHN WILEY & SONS, INC., 2000.

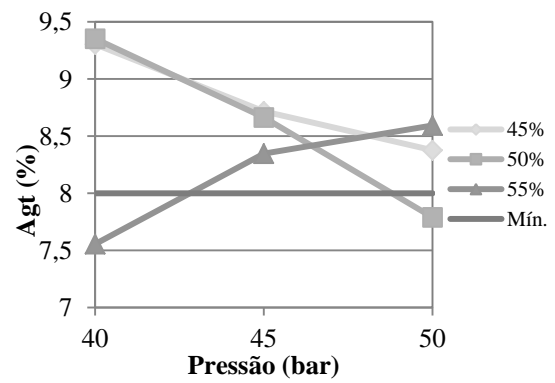
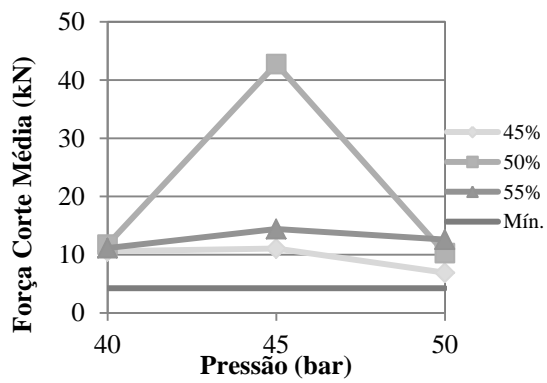
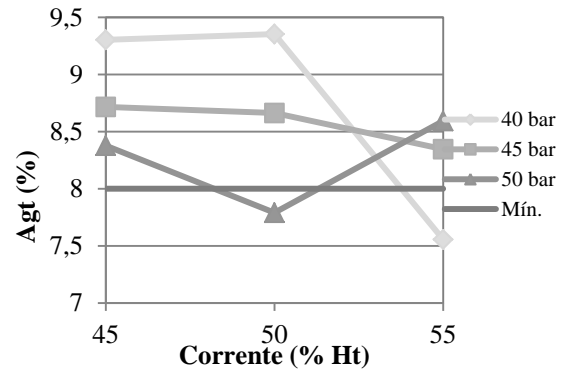
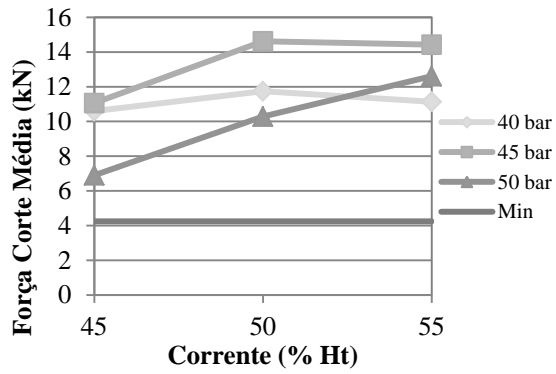
- [26] Hong-Seok Choi, Geun-Hwan Park, Woo-Seung Lim, and Byung-min Kim, "Evaluation of weldability for resistance spot welded single-lap joint between GA780DP and hot-stamped 22MnB5 steel sheets," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 25, 6, pp. 1543-1550, Março 2011.
- [27] H.L. Lin, T. Chou, and C.P. Chou, "Modelling and optimization of the resistance spot welding process via a Taguchi-neural approach in the automobile industry," *PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS PART D-JOURNAL OF AUTOMOBILE ENGINEERING*, vol. 222, D8, pp. 1385-1393, Agosto 2008.
- [28] S. Brauser, L.A. Pepke, G. Weber, and Rethmeier M., "Deformation behaviour of spot-welded high strength steels for automotive applications," *Materials Science and Engineering A*, vol. 527, 26, pp. 7099-7108, Outubro 2010.
- [29] A. K. Lakshminarayanan, V. Balasubramanian, and G. Madhusudhan Reddy, "Microstructure and mechanical properties of electron beam-welded AISI 409M-grade ferritic stainless steel," *International journal of advanced manufacturing technology*, vol. 55, 1-4, pp. 153-162, Dezembro 2011.
- [30] BY NIGEL SCOTCHMER, "The Other Resistance Process: Cross Wire Welding," *Welding Journal*, vol. 16, 1, pp. 36-39, Dezembro 2007.

ANEXOS

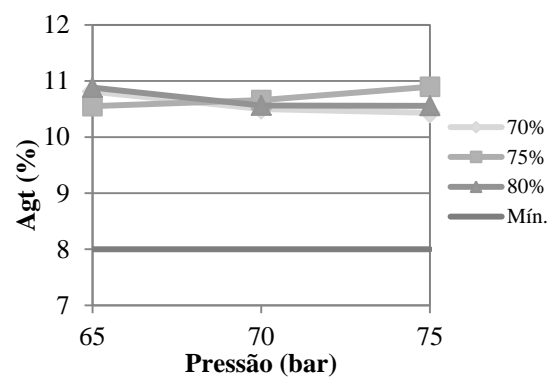
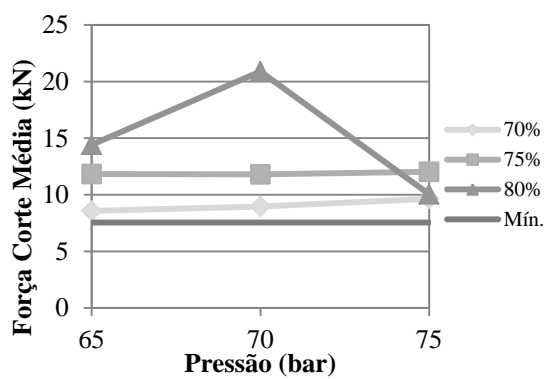
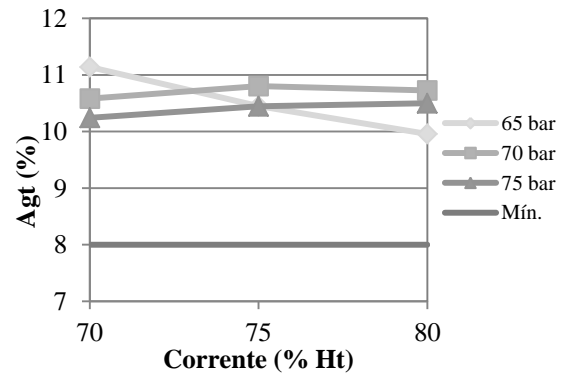
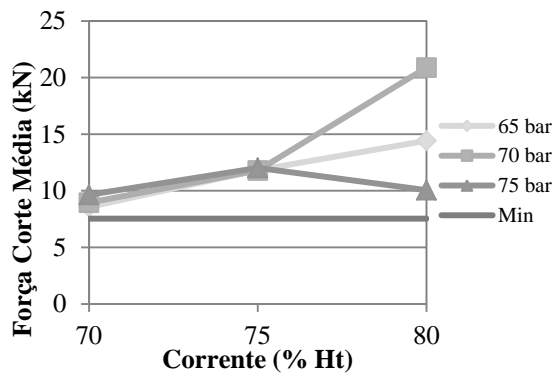
A1. Resultados dos ensaios preliminares de caracterização mecânica de varões de 10 mm de diâmetro, soldados por SRP

Pressão (bar)	Tempo (ciclos)	Corrente (% ht)	Ensaio de Corte (N)
90	10	95	16280
90	10	95	11690
90	10	95	5540
90	10	100	11220
90	10	100	8900
90	10	100	5404
95	10	95	5940
95	10	95	13500
95	10	95	7640
95	10	100	6220
95	10	100	6220
95	10	100	5640
100	10	95	8260
100	10	95	7790
100	10	95	9660
100	10	100	10480
100	10	100	9980
100	10	100	10200
100	10	95	4340
100	10	95	12100
100	10	95	6020
100	10	95	9780
100	10	95	10860
100	10	95	11600
100	10	100	9520
100	10	100	8520
100	10	100	6580
100	12	100	3140
100	12	100	7380
100	12	100	5500
80	10	100	6860
80	10	100	6840
80	10	100	7660
90	10	100	28280
90	10	100	20420
90	10	100	ERRO
90	10	100	11460
90	10	100	7820
90	10	100	7260
80	10	100	9240
80	10	100	3500
80	10	100	10980
80	14	100	15380
80	14	100	11480
80	14	100	13200
90	14	100	14600
90	14	100	3500
90	14	100	6620

A2. Resultados dos ensaios de despistagem para varão de 6mm, ensaiados a 6 ciclos



A3. Resultados dos ensaios de despistagem para varão de 8mm, ensaiados a 8 ciclos



A4. Preparação das amostras metalográficas

A preparação de uma amostra para microscopia teve cinco fases. O corte das amostras, seguindo-se sua montagem em resina.

Com a resina solidificada inicia-se o desgaste com lixa, nesta fase foram montadas lixas de água, em discos rotativos cuja superfície era refrigerada a água, tendo as lixas sido aplicadas pela seguinte ordem: P240, P320, P400, P600, P1200 e P2500, ou seja da maior granulometria para a menor.

Posteriormente procedeu-se a um polimento final, através da colocação de panos para polimento (*Naplan* – estes panos são fabricados em fibra de ceda pura) fixos aos pratos giratórios, colocando alumina líquida em suspensão com uma granulometria de 0.5µm (óxido de alumínio) em pequenas quantidades sobre o pano.

Finalmente foi efectuado o ataque químico, o qual revelou toda a estrutura cristalina da amostra. Este ataque foi efectuado com uma solução de *Nital* a 1%, durante cerca de cinco segundos.

A5. Resultados da caracterização mecânica de varões de 6 mm de diâmetro, soldados por SRP

Ordem ensaios	Ensaio	Original/ Réplica	Corrente (% Ht)	Tempo (ciclos)	Pressão (bar)	Ensaio de Corte I (N)	Ensaio de Corte II (N)
1	23	Réplica1	45	7	50	3500	4920
2	16 (C)	Original	50	6	45	15780	7300
3	14	Original	50	6	55	5500	5560
4	39	Réplica2	45	5	40	9920	7520
5	17 (C)	Original	50	6	45	8940	11760
6	52	Réplica2	50	6	55	9640	9640
7	1	Original	45	5	40	11660	8160
8	13	Original	50	6	35	8140	9620
9	53 (C)	Réplica2	50	6	45	9560	15440
10	8	Original	55	7	50	11940	12280
11	32	Réplica1	50	6	35	9420	14500
12	18 (C)	Original	50	6	45	13540	15260
13	33	Réplica1	50	6	55	7660	9400
14	5	Original	55	5	40	11660	13020
15	30	Réplica1	50	4	45	12300	11000
16	9	Original	40	6	45	8540	5800
17	56 (C)	Réplica2	50	6	45	15280	14860
18	41	Réplica2	45	7	40	5680	14640
19	25	Réplica1	55	5	50	14960	9080
20	15 (C)	Original	50	6	45	5280	7400
21	55 (C)	Réplica2	50	6	45	7020	10020
22	49	Réplica2	50	4	45	8600	11000
23	20	Réplica1	45	5	40	10720	8900
24	48	Réplica2	60	6	45	16560	9380
25	36 (C)	Réplica1	50	6	45	13420	11880
26	27	Réplica1	55	7	50	9620	17760
27	28	Réplica1	40	6	45	13340	5140
28	21	Réplica1	45	5	50	7720	5000
29	26	Réplica1	55	7	40	16760	15940
30	47	Réplica2	40	6	45	5520	5120
31	45	Réplica2	55	7	40	20140	11560
32	43	Réplica2	55	5	40	17460	10700
33	29	Réplica1	60	6	45	13280	15100
34	42	Réplica2	45	7	50	12300	4700
35	44	Réplica2	55	5	50	4060	4440
36	37 (C)	Réplica1	50	6	45	4740	6440
37	31	Réplica1	50	8	45	9140	14200
38	10	Original	60	6	45	17660	14180
39	24	Réplica1	55	5	40	14260	12860
40	22	Réplica1	45	7	40	6540	5680
41	4	Original	45	7	50	11500	7240
42	35 (C)	Réplica1	50	6	45	14360	5680
43	3	Original	45	7	40	8740	8400
44	57 (C)	Réplica2	50	6	45	8300	11600
45	34 (C)	Réplica1	50	6	45	9080	19380
46	7	Original	55	7	40	20300	17980
47	40	Réplica2	45	5	50	3960	7460
48	12	Original	50	8	45	20060	7360
49	46	Réplica2	55	7	50	20680	13020
50	51	Réplica2	50	6	35	14900	16100
51	38 (C)	Réplica1	50	6	45	6060	7840
52	2	Original	45	5	50	7680	5040
53	19 (C)	Original	50	6	45	8220	5560
54	54 (C)	Réplica2	50	6	45	6460	9860
55	50	Réplica2	50	8	45	5400	20780
56	11	Original	50	4	45	6360	4780
57	6	Original	55	5	50	4980	7320

A6. Resultados da caracterização mecânica de varões de 8 mm de diâmetro, soldados por SRP

Ordem ensaios	Ensaio	Original/Réplica	Corrente (% Ht)	Tempo (ciclos)	Pressão (bar)	Ensaio de Corte I (N)	Ensaio de Corte II (N)
1	23	Réplica1	75	9	75	18980	12940
2	16 (C)	Original	80	8	70	14260	13240
3	14	Original	80	8	80	17740	13840
4	39	Réplica2	75	7	65	8140	17660
5	17 (C)	Original	80	8	70	14700	15560
6	52	Réplica2	80	8	80	16320	10960
7	1	Original	75	7	65	15360	16200
8	13	Original	80	8	60	13440	17600
9	53 (C)	Réplica2	80	8	70	15020	12260
10	8	Original	85	9	75	20020	17100
11	32	Réplica1	80	8	60	14540	13040
12	18 (C)	Original	80	8	70	11120	14920
13	33	Réplica1	80	8	80	12180	15880
14	5	Original	85	7	65	11640	18340
15	30	Réplica1	80	6	70	10100	15080
16	9	Original	70	8	70	13540	12400
17	56 (C)	Réplica2	80	8	70	12540	21660
18	41	Réplica2	75	9	65	25280	15420
19	25	Réplica1	85	7	75	22220	12360
20	15 (C)	Original	80	8	70	11540	16020
21	55 (C)	Réplica2	80	8	70	14780	14560
22	49	Réplica2	80	6	70	8660	11120
23	20	Réplica1	75	7	65	16200	9180
24	48	Réplica2	90	8	70	21220	14000
25	36 (C)	Réplica1	80	8	70	18060	19700
26	27	Réplica1	85	9	75	21760	14380
27	28	Réplica1	70	8	70	11540	13440
28	21	Réplica1	75	7	75	13720	12060
29	26	Réplica1	85	9	65	17600	26000
30	47	Réplica2	70	8	70	9480	13560
31	45	Réplica2	85	9	65	24800	20960
32	43	Réplica2	85	7	65	22200	21440
33	29	Réplica1	90	8	70	23920	16540
34	42	Réplica2	75	9	75	10460	13560
35	44	Réplica2	85	7	75	12840	11480
36	37 (C)	Réplica1	80	8	70	17440	11600
37	31	Réplica1	80	10	70	23880	22640
38	10	Original	90	8	70	17460	18100
39	24	Réplica1	85	7	65	18200	14920
40	22	Réplica1	75	9	65	21140	17000
41	4	Original	75	9	75	20580	14482
42	35 (C)	Réplica1	80	8	70	14140	15680
43	3	Original	75	9	65	18540	21380
44	57 (C)	Réplica2	80	8	70	13880	14780
45	34 (C)	Réplica1	80	8	70	18240	20980
46	7	Original	85	9	65	17320	23720
47	40	Réplica2	75	7	75	17460	9140
48	12	Original	80	10	70	16240	23800
49	46	Réplica2	85	9	75	22520	16400
50	51	Réplica2	80	8	60	22920	17460
51	38 (C)	Réplica1	80	8	70	13980	14100
52	2	Original	75	7	75	13800	21220
53	19 (C)	Original	80	8	70	15980	16440
54	54 (C)	Réplica2	80	8	70	17200	15020
55	50	Réplica2	80	10	70	14060	19040
56	11	Original	80	6	70	9000	10160
57	6	Original	85	7	75	20440	11920